Die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit mit dem Drosselkalorimeter und die Anwendung desselben zur Prüfung von Wasserabscheidern.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Albert Sendtner
Diplomingenieur aus München.

Referent: Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Geheimrat Professor Dr. M. Schröter.

Berlin 1910.

Die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit mit dem Drosselkalorimeter und die Anwendung desselben zur Prüfung von Wasserabscheidern.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

ACAD. LUGD BAT BIBL

Vorgelegt von

Albert Sendtner
Diplomingenieur aus München.

Referent: Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Geheimrat Professor Dr. M. Schröter.

Berlin 1910.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555412_0146

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 5
Historischer Ueberblick 6
Chemische Verfahren 7
Hülfsverfahren 7
Kalorimetrische Verfahren 8
Das Drosselkalorimeter 10
Theorie des Drosselkalorimeters 11
Verschiedene Ausführungsformen des Drosselkalorimeters 14
a) Peabody 14
b) Barrus 15
c) eine Modifikation des Instrumentes von Barrus 15
d) Carpenter 16
Fehlerquellen der bisher gebrauchten Instrumente 16
Durchführung der Versuche des Verfassers 20
A) Vorversuche 20
B) Die Durchbildung des Drosselkalorimeters 22
C) Die Prüfung des Drosselkalorimeters 27
a) Prüfung auf Homogenität 28
b) Prüfung auf Genauigkeit 28
1) Prinzip der Prüfung 28
2) Versuchsanordnung 30
c) Prüfungsresultate 32
D) Die Prüfung von Wasserabscheidern 37
Einleitung 37
Versuchsanordnung 39
Durchführung der Untersuchung 40
Versuchsresultate 41
α) Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider 41
β) Abhängigkeit der Abscheidewirkung von Druck und Dampfgeschwindigkeit 42
γ) Bestimmung der Wärmeverluste der Abscheider 50
Praktische Ausführung der Feuchtigkeitsbestimmung des Wasserdampfes . . 52
Schlußbemerkung 52

Die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit mit dem Drosselkalorimeter und die Anwendung desselben zur Prüfung von Wasserabscheidern.

Von **Albert Sendtner.**

Einleitung.

Auf Veranlassung des Vereines deutscher Ingenieure wurde bereits vor 6 Jahren im Laboratorium für techn. Physik an der Kgl. Techn. Hochschule München die Ausarbeitung einer Methode zur Bestimmung der Dampffeuchtigkeit in Rohrleitungen in Angriff genommen und zwar sollte durch zugeführte elektrische Energie die Trocknung und Ueberhitzung des Dampfes bewerkstelligt und aus dem Grad der Ueberhitzung der Feuchtigkeitsgehalt berechnet werden.

Die Versuche wurden zurückgestellt, da damals die Werte der spezifischen Wärme des Wasserdampfes noch nicht genau bekannt waren. Nach Feststellung derselben durch die Untersuchungen von Osc. Knoblauch und M. Jakob[1]), konnten die Versuche zur Bestimmung der Dampfnässe wieder aufgenommen werden und zwar sollte dabei vor allem eine Methode ausgearbeitet werden, welche direkt in der Praxis verwendet werden kann.

Um einem eventl. Einwurf zu begegnen, die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit wäre heute, wo die meisten Kessel mit Ueberhitzern ausgerüstet sind, von untergeordneter Bedeutung, sei gleich eingangs erwähnt, daß fast alle Schiffsmaschinen noch mit gesättigtem Dampf arbeiten, und daß außerdem in vielen Industriezweigen (z. B. in der Kautschukindustrie) nasser Dampf zur Anwendung kommt, wobei es von Wichtigkeit ist, seinen Nässegrad zu kennen.

An Genauigkeit kann die Methode der elektrischen Ueberhitzung wohl von keiner andern erreicht oder gar übertroffen werden; für die Praxis ist sie jedoch nicht anwendbar, da für große Dampfmengen einerseits außerordentlich große und kostspielige Apparate erforderlich wären und anderseits die Versuche geraume Zeit beanspruchen, da von Beginn des Versuches bis zum Eintritt des Beharrungszustandes etwa 5 bis 8 Stdn. verstreichen. Es wurde daher die zurzeit wohl einzige wissenschaftlich einwandfreie Methode der Feuchtigkeitsbestimmung mittels Drosselkalorimeter gewählt, welche darauf beruht, daß der feuchte Dampf unter Drosselung von hohem Druck (Kesseldruck) auf niederen (Atmosphärendruck) expandiert. Da hierbei gleichzeitig die Sättigungstemperatur sinkt, so befindet sich das in dem

[1]) Knoblauch und Jakob: Ueber die Abhängigkeit der spezifischen Wärme c_p des Wasserdampfes von Druck und Temperatur. Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1906 Heft 35 und 36 S. 109.

Dampf auf der Hochdruckseite befindliche tropfbarflüssige Wasser, sobald es auf die Niederdruckseite gelangt, in überhitztem Zustande; es hat somit das Bestreben zu verdampfen, wobei es die dazu nötige Verdampfungswärme dem umgebenden Dampfe entzieht. Je nach der Größe der vorhandenen Dampffeuchtigkeit wird die Dampftemperatur einen Wert zwischen den Sättigungstemperaturen der Hoch- und Niederdruckseite annehmen, bei geringem Feuchtigkeitsgehalt wird sie stets höher bleiben, als die Sättigungstemperatur der Niederdruckseite. Somit ist die Möglichkeit gegeben, den ursprünglich feuchten Dampf zu trocknen und zu überhitzen. Aus dem Grad der Ueberhitzung läßt sich dann unter Berücksichtigung des Druckunterschiedes und der damit in Verbindung stehenden Größen der Prozentsatz der Feuchtigkeit rechnerisch ermitteln. Diese Methode liefert bei sachgemäßer Konstruktion die besten Werte und besitzt außerdem den Vorzug der Handlichkeit.

Um eine einwandfreie Konstruktion ausführen zu können, mußte zuerst eine genaue Untersuchung des Dampfes im Drosselkalorimeter durchgeführt werden. Die bei dieser Untersuchung gesammelten und im nachstehenden beschriebenen Erfahrungen ließen die Notwendigkeit einer Neukonstruktion des Drosselkalorimeters erkennen. Nachdem diese ausgeführt und die mit dem neuen Apparat erreichbare Genauigkeit der Feuchtigkeitsbestimmung festgestellt war, wurde derselbe zur Prüfung einiger Wasserabscheider verwendet, über deren Wirksamkeit bisher fast völlige Unklarheit bestand.

Die Untersuchung der Wasserabscheider gab auch die Möglichkeit, die Verteilung der Feuchtigkeit auf die einzelnen Teile des Querschnittes der Dampfleitungen zu untersuchen.

Danach gliedert sich die Arbeit in folgende Teile[1]):

1) Ueberblick über die bisher angewandten Verfahren und Apparate zur Feuchtigkeitsbestimmung.
2) Konstruktion eines Drosselkalorimeters für große Dampfmengen auf Grund der bei den Untersuchungen des Zustandes im Expansionsraum gemachten Beobachtungen.
3) Prüfung des Kalorimeters.
4) Untersuchung einiger Wasserabscheider auf ihre Leistungsfähigkeit mittels dieses Kalorimeters.

Historischer Ueberblick.

Es ist das Verdienst des erfolgreichen Physikers und Thermodynamikers Gust. Adolf Hirn, zuerst auf die Wichtigkeit der Kenntnis des Wassergehaltes von gesättigtem Dampf in Rohrleitungen hingewiesen und auch Methoden zur Bestimmung dieser Größe angegeben zu haben.

Auf seine Anregung hin tauchten eine große Zahl mehr oder weniger brauchbarer Methoden auf, die Ernst Brückner in seiner kritisch-historischen Arbeit »Die Mengenbestimmung des Wassergehaltes im Kesseldampf«[2]) zusammengestellt hat.

Es erübrigt sich daher, alle diese Verfahren hier nochmals genau zu beschreiben; ich werde sie kurz besprechen und nur auf die, seit dieser Veröffentlichung, also seit 1898 neu angegebenen Methoden näher eingehen.

Brückner teilt die Methoden zur Bestimmung des Wassergehaltes im Dampf in 3 Klassen:

[1]) Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse findet sich am Schlusse der Arbeit S. 52.
[2]) E. Brückner: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1898 S. 601, 603, 662.

I) Chemische Verfahren.
II) Hülfsverfahren.
III) Physikalisch begründete Verfahren.

Die erste Gruppe, bei welcher aus der Veränderung des dem Speisewasser zugesetzten Salzgehaltes auf die Menge mitgerissenen Wassers geschlossenen wird, braucht hier wohl nicht weiter erörtert zu werden. Die Anwendung dieser Methoden ist so umständlich und die damit erzielten Resultate sind von solcher Unsicherheit und Ungenauigkeit, daß ihre Anwendung selbst für grobe technische Messungen ausgeschlossen ist. Brückner erwähnt, daß die Messungen an Lokomobilkesseln, welche bekanntlich in den damals üblichen Konstruktionen den feuchtesten Dampf lieferten, ergeben hätten, daß der Dampf vollkommen trocken wäre. Damit ist auch das Urteil über diese Verfahren ausgesprochen.

Zu den Hülfsverfahren zählt in erster Linie die Beurteilung nach dem Aussehen des aus einer Düse frei ausströmenden Dampfes. Der Dampfkegel zeigt hierbei je nach seinem Wassergehalt charakteristische Färbung.

Das zweite zu dieser Gruppe gehörige Verfahren, den Feuchtigkeitsgrad mit Hülfe von Wasserabscheidern zu bestimmen, gibt auch nur ungefähre Anhaltspunkte, da sich das Verfahren auf die unrichtige Voraussetzung gründet, daß der Dampf alles in tropfbarflüssigem Zustand mitgerissene Wasser im Abscheider wieder abgibt. Die zur rechnerischen Bestimmung des Wassergehaltes erforderliche Dampfmengenmessung geschieht entweder mittels eines, hinter den Abscheider geschalteten Kondensators oder bei einer von Carpenter[1]) angegebenen Ausführungsform mittels geeichter Düsen, durch welche der Dampf aus dem Abscheider in das Freie gelangt.

Während die bisher aufgeführten Verfahren der streng wissenschaftlichen Grundlage entbehren, sind die nachstehend beschriebenen der III. Klasse nach Brückners Einteilung auf physikalischen Gesetzen aufgebaut.

Eine Reihe von derartigen Methoden beruht auf der Feststellung des spezifischen Gewichtes eines abgeschlossenen aus der Hauptleitung entnommenen Dampfvolumens. Aus der Differenz des sich durch diese Bestimmung ergebenden und dem spezifischen Dampfgewicht, das dem in der Leitung herrschenden Dampfdruck entspricht, läßt sich dann die im Dampf enthaltene Wassermenge ermitteln.

Diese Art der Feuchtigkeitsbestimmung leidet jedoch unter dem Nachteil, daß zur Entnahme einer Dampfprobe eine Erweiterung in der Rohrleitung erforderlich ist, welche als Wasserabscheider wirkt. Dazu kommt noch die Schwierigkeit, das Gewicht des abgeschlossenen Dampfvolumens mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen, da hierbei das Gewicht des Gefäßes dasjenige des eingeschlossenen Dampfes um ein Vielfaches übersteigt.

Das von Boye und Müller[2]) konstruierte, sowie das von Brocq erfundene Instrument beruhen auf der umkehrbaren isothermischen Zustandsänderung durch Wärmemitteilung bei veränderlichem Volumen, während ein von Gehre angegebenes und früher viel angewendetes Verfahren auf der umkehrbaren Zustandsänderung bei konstantem Volumen durch Wärmezufuhr bei veränderlichem Druck und veränderlicher Temperatur basiert. Während erstere Instrumente den Nachteil großer Kompliziertheit aufweisen ohne dabei auf Zuverlässigkeit der Resultate Anspruch machen zu können, besitzt die Gehresche Vorrichtuug den Mangel, daß eine Homogenität im ganzen Querschnitt durch einfaches Heizen des Dampfrohres mittels untergestellter Gasbrenner nicht erreicht werden kann.

[1]) Carpenter, Trans. Amer. Soc. Mech. Engineers 1896 Bd. XVII.
[2]) Dinglers Polytechn. Journal 1882 Bd. 244 S. 199.

Weit wichtiger als diese Methoden, die eigentlich nur noch historisches Interesse haben, sind die kalometrischen Verfahren.

Die einfachsten dieser Gruppe sind die Kondensationsverfahren, die sich wieder unterscheiden in:

1) intermittierende,
2) kontinuierliche.

Das von Hirn[1]) zuerst angegebene Verfahren gehörte der 1. Kategorie an; das verwendete Instrument war ein Mischkondensator. — Das von Linde[2]) konstruierte Wasserkalorimeter, ebenso wie das Barrussche[3]) sind zur zweiten Klasse zu rechnen. Bei den beiden letztgenannten Instrumenten, welche als Oberflächenkondensatoren gebaut sind, fällt die dem erstgenannten anhaftende Fehlerquelle der ungenauen Gewichtsbestimmung des Kondensats weg.

Eine zweite von Hirn empfohlene Methode berechnet die Feuchtigkeit des Dampfes aus der Wärmebilanz der Dampfmaschine. Die damit erhaltenen Resultate sind jedoch wenig zufriedenstellend, weil die Fehlerquellen bei der Untersuchung einer Dampfmaschine viel zu groß sind, um eine so empfindliche Größe wie die Dampffeuchtigkeit ermitteln zu können. Nur die Einfachheit der Anwendung, da fast alle zu bestimmenden Größen bei Leistungsprüfung einer Dampfmaschine an und für sich zu messen sind, können zugunsten dieser Methode in die Wagschale fallen.

Von den Ueberhitzungs-Verfahren ist in erster Linie das von Barrus[3]) zu erwähnen, bei welchem die Trocknung und Ueberhitzung des Kesseldampfes, der durch eine Rohrspirale geführt wird, durch überhitzten Dampf bewirkt wird, der um diese Spirale strömt. Wenn die Dampfmenge in der Spirale sowie die Menge des Heizdampfes, dann die Temperaturen des nassen und des überhitzten Dampfes vor und nach dem Passieren des Apparates bekannt sind, läßt sich der Feuchtigkeitsgrad leicht berechnen.

Ein ähnliches Prinzip liegt dem Kalorimeter von Rateau[4]) zugrunde, bei welchem der Dampf in 2 gleiche Teile geteilt, 2 Rohre passiert, wobei der in dem einen fließende, durch sorgfältige Isolation auf dem ursprünglichen Zustand erhalten wird, während die zweite Hälfte in dem andern Rohr eine Ueberhitzung erfährt. Die beiden Teile werden hierauf wieder zusammengeführt. Aus der sich ergebenden Mischungstemperatur läßt sich dann bei bekannter Sättigungs- und Ueberhitzungstemperatur auf die ursprüngliche Feuchtigkeit des Dampfes schließen.

Ein sehr handliches Instrument, das ebenfalls zur Klasse der Ueberhitzungskalorimeter gehört, ist das von C. C. Thomas (1907)[5]) konstruierte. Die Trocknung und Ueberhitzung des Dampfes erfolgt hierbei durch elektrische Energie. Die Konstruktion des Kalorimeters ist aus Fig. 1 ersichtlich. Der Dampf wird unten in den Ueberhitzer eingeleitet. Derselbe besteht aus einer zylindrischen Kammer, in welche die Heizkörper in Form von spiralförmig aufgewundenen Widerstandsdrähten so eingebaut sind, daß zwischen den einzelnen Spiralen nur wenig Zwischenraum bleibt; durch diesen muß der Dampf strömen, wobei er getrocknet und mäßig überhitzt

---

[1]) Hirn, Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse 1896 S. 543.

[2]) Linde, Bericht über die Versammlung des Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine, München 1877 S. 43.

[3]) Barrus, Trans. A. S. M. E. 1886 Bd. VII S. 179.

[4]) Mitteilungen aus der Praxis des Dampfkessel- und Dampfmaschinenbetriebes, XXI. Jahrgang 1898 Nr. 3.

[5]) Carl C. Thomas, Ithaca-New York. The Quality of Steam.

wird. In den oberen Teil des Ueberhitzers ragt eine Metallhülse, welche das Thermometer enthält.

Bevor der Dampf das Kalorimeter verläßt, passiert er eine Glasröhre, welche eine Beurteilung der Feuchtigkeit nach dem Aussehen des durchströmenden Dampfes ermöglichen soll.

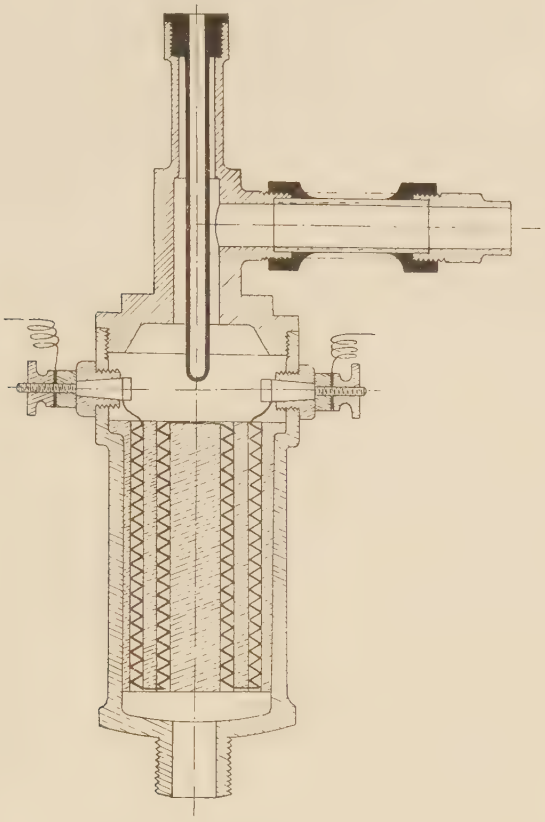

Fig. 1. Kalorimeter nach Thomas.

Die Feuchtigkeit y berechnet sich bei dem Instrument aus folgender Gleichung: es ist

$$W = G\,y\,r + G\,c_p(t_2 - t_s),$$

daraus

$$y = \frac{\frac{W}{G} - c_p(t_2 - t_s)}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1),$$

wo W die in Form elektrischer Energie zugeführte Wärmemenge,
G das Gewicht des in der Zeiteinheit durchströmenden Dampfes,
c_p die spezifische Wärme des Dampfes,
t_s die Sättigungstemperatur,
t_2 die am Thermometer abgelesene Ueberhitzungstemperatur,
r die Verdampfungswärme bedeutet.

Nach den Angaben von Thomas verfährt man bei der Feuchtigkeitsbestimmung wie folgt:

Man läßt Dampf durch das Kalorimeter strömen und fügt demselben Wärme durch elektrische Heizung zu, die so lange gesteigert wird, bis einerseits die Tem-

peratur über die Sättigungstemperatur zu steigen beginnt und anderseits in dem Schauglas keine Wassertröpfchen mehr sichtbar sind. Die zugeführte Energie sei E_I. Erhöht man nun die Wattzahl auf E_{II}, so tritt Ueberhitzung ein. Aus der zur Ueberhitzung aufgewendeten Energie $E_{II} - E_I$ und der dadurch erzielten Temperatursteigerung $t_2 - t_s$ wird nun die das Kalorimeter in der Zeiteinheit durchströmende Dampfmenge G ermittelt. — In dieser Feststellung ist wohl die größte Fehlerquelle des Instrumentes zu suchen. Eine andre Fehlerquelle liegt in Folgendem: Bei der Aufstellung der obigen Gleichung ist stillschweigend die Annahme gemacht, daß bei der Wärmezufuhr an den feuchten Dampf zunächst das in ihm vorhandene tropfbarflüssige Wasser verdampft und dann der so entstandene trockengesättigte Dampf überhitzt wird. Diese Annahme ist jedoch in den seltensten Fällen erfüllt. An den hoch erhitzten Heizdrähten tritt nämlich eine Art Leidenfrostsche Erscheinung[1]) auf, der Dampf verläßt überhitzt die Heizkörper, ohne getrocknet zu sein. Es läßt sich mithin nicht festlegen, welcher Teil der zugeführten elektrischen Energie zur Trocknung und welcher zur Ueberhitzung verwendet wurde. Auch die Beobachtung des Dampfes in dem Glasrohr, ob noch Wassertröpfchen sichtbar sind, und der darauf gegründete Schluß auf die Trockenheit des Dampfes ist viel zu wenig stichhaltig, als daß man daraus den Uebergang des Dampfes aus dem trockengesättigten in den überhitzten Zustand entnehmen könnte. Endlich spricht die Unsicherheit, die durch die ungenaue Kenntnis von c_p gerade in Sättigungsnähe dazu tritt, wenig für diese Art der Messung.

Das Kalorimeter ist nur für kleine Dampfmengen eingerichtet, also für Dampfproben, die der Hauptleitung entnommen werden. Auch darin liegt, trotz einer verbesserten Entnahmevorrichtung, wie im weiteren gezeigt werden soll, eine nicht zu vernachlässigende Fehlerquelle.

Drosselkalorimeter.

Die bisher erwähnten kalorimetrischen Methoden leiden alle an dem Uebelstand, daß zu ihrer Durchführung eine große Anzahl von Messungen erforderlich ist, von denen naturgemäß jede einzelne eine Fehlerquelle in sich birgt. Besonders die mit Wägung des Kondensats oder Kühlwassers verbundenen weisen immer beträchtliche Ungenauigkeiten auf.

Durch das Drosselkalorimeter, das zuerst von Peabody (1888) gelegentlich der XVIII. Versammlung der »American Society of Mechanical Engineers«[2]) in Scranton angegeben wurde und das auf dem von Hirn entdeckten Phänomen der Ueberhitzung von gedrosseltem, gesättigtem Dampf beruht, ist uns nun ein Mittel an die Hand gegeben, nur durch Druck- und Temperaturmessungen die Dampfnässe zu ermitteln.

Man kann also das Drosselkalorimeter auch als ein Ueberhitzungskalorimeter auffassen, das sich jedoch von den andern wesentlich dadurch unterscheidet, daß die Ueberhitzungswärme nicht von außen zugeführt, sondern wie bereits S. 5 erwähnt, der Eigenwärme des feuchten Dampfes entnommen wird. Das im Dampfe befindliche flüssige Wasser befindet sich hierbei beim niedrigen Druck p_2 im überhitzten, also labilen Zustande und hat von sich aus schon das Bestreben in den stabilen, also dampfförmigen Zustand überzugehen. Freilich muß dem überhitztem Wasser auch die zur Verdampfung nötige Wärme zur Verfügung gestellt werden.

[1]) Vergl. auch Knoblauch und Jakob, a. a. O. S. 116.

[2]) Peabody, Transactions of the A. S. of M. E. 1888.

In welcher Weise diese Verdampfung im Drosselkalorimeter durch passende Konstruktion desselben möglichst unterstützt und daher beschleunigt werden kann, ist unten ausgeführt.

Theorie des Drosselkalorimeters.

In Nachstehendem bezeichne:

$\psi = AP\,(v - v')$ das Aequivalent der äußeren Verdampfungsarbeit,
$v =$ das Volumen von 1 kg Dampf in cbm,
$P =$ den Druck in kg/qm,
$p =$ den Druck in kg/qcm,
$t =$ die Temperatur in ^{0}C,
$T =$ die absolute Temperatur,
$i =$ den Wärmeinhalt des Dampfes, bei den weiteren Berechnungen i_1 den Wärmeinhalt vor, i_2 hinter der Drosselstelle,
$c_p =$ die spezifische Wärme bei konstantem Druck,
$c_p{}^0 =$ » » » » » » für $p = o$,
$A = \frac{1}{427}$ den Wärmewert der Arbeitseinheit,
$R = 47{,}00$ die Gaskonstante des Wasserdampfes,
$C = 0{,}075$,
$n = 10/3$,
$v' = 0{,}001$ spezifisches Volumen des Wassers.

Der Wärmeinhalt von gesättigtem Dampf vom Druck p berechnet sich nach den Mollierschen Dampftabellen[1]), die allen in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen zugrunde gelegt sind, aus der allgemeinen Wärmegleichung:

$$T\,ds = di - Av\,dP \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2),$$

zu

$$i = \int c_p{}^0\,dt - AT^2 \int \left(\frac{d\left(\frac{v}{T}\right)}{dt} \right)_P dp + \text{konst.}$$

Durch Substitution erhält man unter Verwendung der Callendarschen Zustandsgleichung, welche lautet:

$$v - v' = \frac{RT}{P} - C\left(\frac{273}{T}\right)^n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3),$$

und unter Annahme, daß $c_p{}^0$ konstant ist,

$$i = c_p{}^0\,dt - (n+1)\,AC\left(\frac{273}{T}\right)^n P + Av'P + \text{konst.}$$

oder

$$i = (n+1)\,\psi\,Av'P + \text{konst.} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4).$$

Unter der Annahme, daß der zu untersuchende Dampf pro Gewichtseinheit y kg tropfbarflüssiges Wasser enthält, ist der Wärmeinhalt von 1 kg dieses Gemisches, von 0^0 ab gerechnet,

$$Q = y q_1 + (1 - y)\,i_1,$$

wobei q_1 den Wärmeinhalt des Wassers bei Sättigungstemperatur bedeutet. Läßt man nun den Dampf vom Druck p_1 durch Ausströmen aus einer Oeffnung adia-

[1]) R. Mollier, Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Berlin, J. Springer 1906.

batisch auf den Druck p_2 expandieren, so muß sich in 1 kg Dampf der Niederdruckseite wieder obige Wärmemenge vorfinden, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit vor und hinter der Drosselstelle dieselbe ist und kein Wärmeverlust entsteht. Da aber der Wärmeinhalt i_2 von gesättigtem Dampf vom Druck p_2 kleiner ist als i_1, so bleibt, falls der Druckunterschied so groß gewählt wurde, daß

$$y q_1 + (1 - y) i_1 > i_2,$$

bei dem erwähnten Drosselvorgang ein Wärmeüberschuß

$$Q_1 = y q_1 + (1 - y) i_1 - i_2$$

zur Verdampfung des vorhandenen Wassers und Ueberhitzung des Dampfes verfügbar. Da, wie erwähnt, der Wärmeinhalt des Dampfes vor und hinter der Drosselstelle gleich groß ist, so hat folgende Gleichung Gültigkeit:

$$(1 - y)\, i_1 + y q_1 = i_2 + \int_{t_{2s}}^{t_2'} c_p\, dt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5),$$

wobei i_1 die Gesamtwärme des Dampfes auf der Hochdruckseite, i_2 die Dampfwärme auf der Niederdruckseite, y den Bruchteil tropfbarflüssigen im Dampf enthaltenen Wassers, q_1 dessen Wärmeinhalt, t_{2s} die dem Niederdruck entsprechende Sättigungstemperatur und t_2' die auf der Niederdruckseite auftretende Ueberhitzungstemperatur bedeutet.

Aus dieser Gleichung berechnet sich dann der Feuchtigkeitsgehalt

$$y = \frac{i_1 - i_2 - \int_{t_{2s}}^{t_2'} c_p\, dt}{i_1 - q_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6),$$

oder, da

$$i_1 - q_1 = r_1,$$

d. i. gleich der Verdampfungswärme (für den Hochdruck), so wird

$$y = \frac{i_1 - i_2 - \int_{t_{2s}}^{t_2'} c_p\, dt}{r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7).$$

Falls nicht, wie oben angenommen, die kinetische Energie vor und hinter der Drosselstelle gleich groß ist, so muß diese Aenderung in Rechnung gezogen werden.

Die Wärmemenge, welche durch dieselbe dem Dampf entzogen wird, berechnet sich zu

$$Q' = \frac{A\,(w_2^2 - w_1^2)}{2\,g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8),$$

wobei w_1 und w_2 die Geschwindigkeiten des Dampfes vor und hinter der Drosselstelle bedeuten.

Eine weitere Korrektion wird notwendig, wenn der Dampf während des Drosselns Wärme nach außen abgibt, wenn also der Vorgang nicht adiabatisch erfolgt.

Die durch Strahlung und Leitung nach außen abgegebene Gesamtwärmemenge ergibt sich aus der Gleichung[1]):

$$Q = \frac{l\,\pi}{2} \cdot \frac{t_2' - t_a}{\frac{1}{\alpha\, d_1} + \frac{1}{\beta\, d_2} + \frac{1}{2\,\delta} \log\,\text{nat}\,\frac{d_2}{d_1}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9),$$

[1]) Vergl. das Taschenbuch des Ingenieurs. (Herausgegeben vom Verein »Hütte«.)

in welcher

α den Koeffizienten des Wärmeüberganges von Dampf an das Material der der Expansionskammer,
β denjenigen von diesem Material an Luft,
δ den Wärmeleitungskoeffizienten dieses Materials,
t_2' die Temperatur das Dampfes hinter der Drosselstelle,
t_a die Lufttemperatur in der Umgebung des Kalorimeters,
l die Länge,
d_1 den inneren Durchmesser, } der als zylindrisch angenommenen
d_2 den äußeren Durchmesser, } Expansionskammer

bezeichnen.

Unter Berücksichtigung dieser Verluste nimmt die Gleichung zur Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes folgende Gestalt an:

$$y = \frac{1}{r_1}\left(i_1 - i_2 - \int_{t_{2s}}^{t_1'} c_p \, dt - A\frac{{w_2}^2 - {w_1}^2}{2g} - \frac{l\pi}{2G} \cdot \frac{t_2' - t_a}{\frac{1}{\alpha d_1} + \frac{1}{\beta d_2} + \frac{1}{2\delta} \log\text{nat}\frac{d_2}{d_1}} \right) \quad (10).$$

G = Gewicht der stündlich durch das Kalorimeter gehenden Dampfmenge.

Durch passende Wahl der Versuchsanordnung wird man es jedoch erreichen können, daß statt dieser allgemeinen Beziehung die spezielle Gl. (7) zur Anwendung kommen kann. Wenn man nämlich dafür sorgt, daß die Geschwindigkeit des Dampfes vor und hinter der Drosselstelle gleich groß ist, und daß durch eine genügende Isolation die Wärmeverluste verschwindend klein werden, so fallen die beiden Korrektionsglieder aus der Gleichung fort. Da die Ueberhitzung auf der Niederdruckseite nie sehr groß sein wird, so kann man in dem Temperaturbereich von $t_{2s} - t_2'$ die spezifische Wärme als unveränderlich annehmen und mit c_{pm} bezeichnen. Die Gl. (7) nimmt dann die endgültige, einfache Gestalt an:

$$y = \frac{i_1 - i_2 - c_{pm}(t_2' - t_{2s})}{r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11).$$

Von Interesse ist es, den Meßbereich des Kalorimeters übersehen zu können, d. h. zu wissen, welchen Höchstwert von Feuchtigkeit man bei gegebenem Druck-

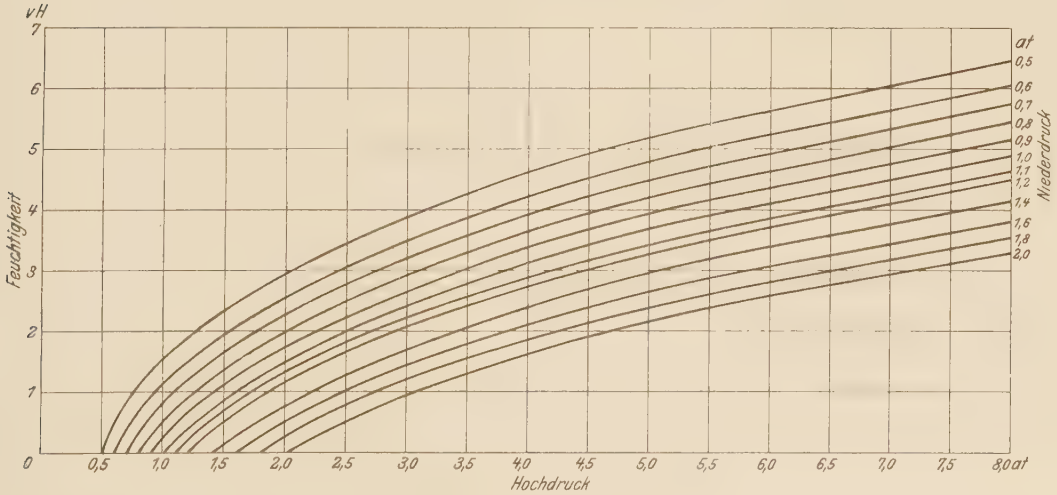

Fig. 2. Meßbereich des Drosselkalorimeters.

gefälle mit dem Drosselkalorimeter bestimmen kann. Diesen Wert y_{max} erhält man, wenn man in der letzten Gl. (11) $t_2' - t_{2s} = 0$ setzt, woraus sich

$$y_{max} = \frac{i_1 \quad i_2}{r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

ergibt.

Mit dieser Gleichung sind die in Kurventafel 2 verzeichneten Kurven berechnet. Der Druck der Hochdruckseite ist als Abszisse, die maximale Feuchtigkeit in Prozenten als Ordinate aufgetragen. Die eingezeichneten Kurven stellen für die gebräuchlichen Werte des Niederdruckes von 0,5 bis 2,0 kg/qcm die Maximalfeuchtigkeit als Funktion des Druckes auf der Hochdruckseite dar.

Ob dieser Maximalwert der Feuchtigkeit von einem gegebenen Drosselkalorimeter wirklich bewältigt wird, kann freilich nur durch eine experimentelle Prüfung desselben oder durch eine empirische Eichung etwa nach dem auf S. 27 angegebenen Verfahren ermittelt werden.

Verschiedene Konstruktionen des Drosselkalorimeters.

Die erste Konstruktion von Peabody[1]) ist aus Fig. 3 zu ersehen. Das Instrument war vollständig aus Rohren zusammengebaut. Ein $^1/_2$″ Rohr leitete den Dampf aus der Hauptleitung dem Expansionsraum zu, der aus einem Rohr von 6″ Dmr.

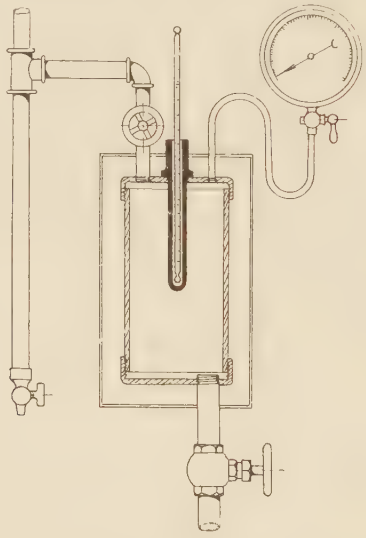

Fig. 3. Drosselkalorimeter nach Peabody.

und 10″ Länge bestand, das oben und unten verschlossen war. Ein zweites Rohr von 1″ ließ den Dampf wieder entweichen oder führte ihn dem Kondensator zu. In dem oberen Verschluß des Expansionsraumes war noch ein Thermometer und ein Manometeranschluß angebracht. Zwei Niederschraubventile gestatteten die Regulierung des Druckes im Kalorimeter. Durch gute Isolation war die Wärmeabgabe nach außen möglichst herabgemindert.

Barrus[2]) hat bei der Konstruktion den Meßbereich des Kalorimeters dadurch erweitert, daß er vor dasselbe ein Abscheidekalorimeter setzte, Fig. 4. Dasselbe

[1]) Peabody a. a. O.

[2]) Barrus, Transaction A. S. W. E. Bd. XI S. 790 und Engineering 1895 Bd. LIX S. 261.

besteht aus einem zylindrischen Gefäß, in welches der Dampf durch ein von oben bis zur halben Länge des Gefäßes reichendes Rohr eingeführt und aus welchem er durch ein oben seitlich angebrachtes Rohrstück dem Drosselkalorimeter zugeleitet wird. Durch die Richtungsänderung gibt der Dampf einen Teil seines Feuchtigkeitsgehaltes hier ab. Ein Wasserstand läßt die auf diese Weise entzogene Wassermenge feststellen. Zur rechnerischen Auswertung ist die zugehörige Dampfmenge zu bestimmen; diese wird, wie schon früher beschrieben, durch geeichte Düsen gemessen, welche hier zugleich als Drosselstellen dienen. An die Stelle einer Druckmessung vor der Drosselstelle tritt hier eine Temperaturbestimmung durch ein in das Dampfzuleitungsrohr eingeführtes Quecksilberthermometer. Auf dieselbe Weise wird die Temperatur hinter der Drosselstelle gemessen.

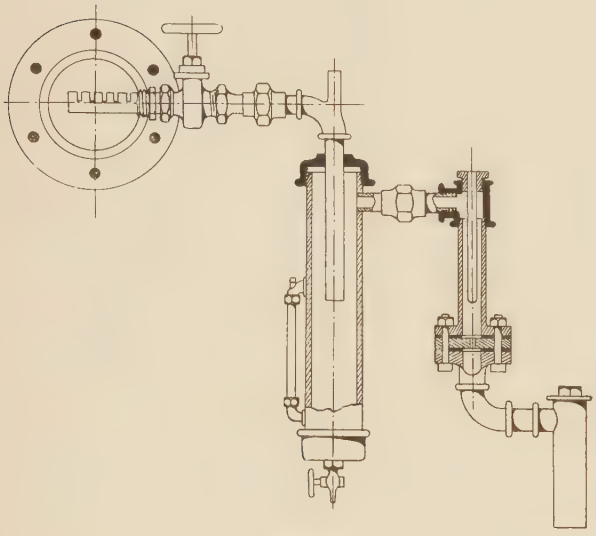

Fig. 4.

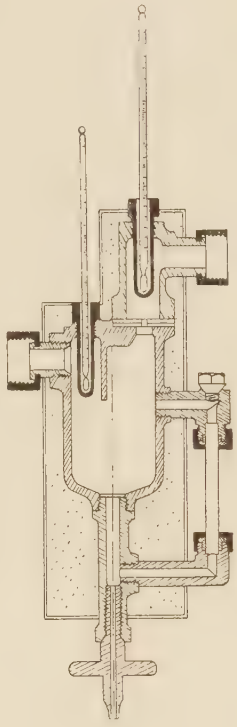

Fig. 5.

Fig. 4 und 5. Drosselkalorimeter nach Barrus.

Der ganze Apparat ist mit einem polierten Nickelüberzug versehen, der als Strahlungsschutz dienen soll. Als Entnahmevorrichtung dient ein radial in das Hauptrohr eingeführtes Rohr von geringerem Durchmesser, das am Ende verschlossen ist und durch mehrere, senkrecht zur Achse bis zur Rohrmitte eingefräste Schlitze den Dampf einströmen läßt.

In Fig. 5 ist eine Modifikation des Barrusschen Drosselkalorimeters dargestellt, bei welcher Abscheider und Kalorimeter starr verbunden in einen Kasten eingebaut sind, der mit wärmeisolierendem Material gefüllt, das Kalorimeter gegen zu große Wärmeabgabe nach außen schützt. Um eine größere Genauigkeit bei der Feststellung der im Wasserabscheider abgenommenen Wassermenge zu erzielen, ist der untere Teil des Abscheiders als Zylinder mit geringem Durchmesser ausgeführt.

Die einfachste Form zeigt das von Carpenter angegebene, von Schäffer & Budenberg ausgeführte Drosselkalorimeter, Fig. 6.

Dasselbe besteht aus einem in Messingguß hergestellten birnenförmigen Hohlkörper, dem Expansionsraum, in welchen von der einen Seite der Dampf durch eine düsenförmige Oeffnung eintritt, und aus dem er unten wieder in die Atmosphäre ausbläst oder in einen Kondensator abgeleitet wird. Eine von oben in das

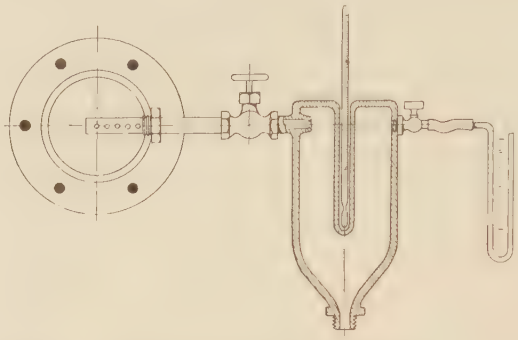

Fig. 6. Drosselkalorimeter nach Carpenter. 1 : 5.

Innere des Expansionsraumes ragende Metallhülse, die beim Gebrauch des Instrumentes mit Oel gefüllt wird, dient zur Aufnahme des Thermometers. Die Messung des Druckes hinter der Drosselstelle geschieht durch ein an die Expansionskammer angeschlossenes gewöhnliches Quecksilbermanometer.

Fehlerquellen der bisher gebrauchten Drosselkalorimeter.

Wenn wegen der Einfachheit der Konstruktion und Handhabung die in vorstehenden Zeilen angeführten Drosselkalorimeterkonstruktionen in der Praxis vielfach Anwendung gefunden haben, so sind gegen die Richtigkeit ihrer Angaben doch folgende gewichtige Bedenken zu erheben:

1) Von der Hochdruckseite zur Niederdruckseite findet ein Wärmeübergang statt, da die beiden Teile entweder direkt metallisch miteinander in Verbindung stehen oder nur durch zwischen gelegte Gummiplatten geringer Dicke voneinander getrennt sind.

Da die Temperaturabnahme von der Hockdruck- zur Niederdruckseite ziemlich beträchtlich ist (z. B. bei 8 at Hochdruck und 1 at Niederdruck unter Umständen etwa 70°), so ist es erklärlich, daß die auf die Niederdruckseite überströmende Wärmemenge nicht außer acht gelassen werden darf.

2) Die kleinen Drosselkalorimeter entbehren fast alle einer Isolation, die sie gegen Wärmeabgabe nach außen schützte. Der hierdurch bedingte Wärmeverlust hat eine Erniedrigung der Temperatur des überhitzten Dampfes der Niederdruckseite zur Folge, während er auf die Temperatur des feuchten Dampfes der Hochdruckseite ohne Einfluß bleibt.

Wenn trotzdem manche mit den beschriebenen Instrumenten angestellte Versuche ziemlich richtige Werte der Feuchtigkeit ergaben, so ist das dem Umstand zuzuschreiben, daß unter den gerade herrschenden Versuchsbedingungen die Wärmeverluste der Niederdruckseite durch die aus der Hochdruckseite zuströmende Wärmemenge annähernd gedeckt wurden.

3) Für die sichere Verdampfung des Wassers im Expansionsraum ist keinerlei Gewähr geboten. Daß in überhitztem Dampf sich Wasser in tropfbarflüssigem Zustand vorfinden kann und sich beim Drosselvorgang wirklich vorfindet, ist durch

die Versuche von Knoblauch und Jakob[1]), Richter[2]) erwiesen, welch letzterer in seiner Veröffentlichung: »Beitrag zur Frage: Kann überhitzter Dampf Wasser ententhalten?« schreibt:

> »Denn bei dem vor der Düse vorhandenen Sättigungszustand mußte in»folge der adiabatischen Expansion an der Mündung der Düse Wasser»gehalt vorhanden sein, wie auch stets deutlich zu sehen war[3])«.

Dadurch wird natürlich die Temperaturmessung im Expansionsraum unsicher, da das an der Mündung auftretende Wasser vom Dampfstrom an die Metallhülse geschleudert wird, welche das Thermometer enthält. Die zur Verdampfung nötige Wärme wird der Metallhülse entzogen und infolgedessen hier eine lokale Temperatursenkung hervorgerufen, so daß das Thermometer nicht die mittlere Dampftemperatur angibt.

4) Der größte Mangel, der den kleinen Drosselkalorimetern anhaftet, liegt in der Schwierigkeit, wenn nicht Unmöglichkeit, der Entnahme einer Dampfprobe von genau denselben Eigenschaften wie sie der Hauptdampfstrom besitzt.

Denton hat ausführliche Versuche angestellt, um die Brauchbarkeit der Entnahmevorrichtungen sowie der Drosselkalorimeter zu erproben. Die Resultate hat er in seiner Arbeit »The Reliability of Throttling Calorimeters« niedergelegt[4]).

Zum Zweck der Prüfung verglich er kleine Kalorimeter mit einem großen, das einfach aus einer beträchtlichen Erweiterung der Rohrleitung bestand, vor welche ein Wasserabscheider gesetzt wurde. Die Drosselstelle bildete ein zwischen Expansionskammer und Abscheider gesetztes Niederschraubventil. Das Instrument ist somit den kleinen Kalorimetern vollkommen nachgebildet, aber dadurch auch mit all den Mängeln behaftet, die die Brauchbarkeit derselben in Frage stellen. Die Resultate können daher nur in beschränktem Umfange als richtig anerkannt werden. Die Abweichungen der Angaben der kleineren Instrumente von dem großen sind nach diesen Versuchen so groß, daß sie nicht allein durch die Konstruktionsfehler des großen Instrumentes erklärt werden können, sondern (wie aus dem Folgenden hervorgeht), durch die Entnahmevorrichtung bedingt sein müssen.

Denton gliedert seine Arbeit in 4 Teile:

a) Konstruktion des großen Drosselkalorimeters.

b) Vergleich der Angaben desselben mit den durch kleine Kalorimeter (System Barrus) erhaltenen, die mit gewöhnlichen Entnahmevorrichtungen (radial in das Dampfrohr geführten Rohren mit mehreren Bohrungen) an die Dampfleitung angeschlossen wurden.

Bei einer durch das große Kalorimeter bestimmten Feuchtigkeit von 21,6 und 17,6 vH ergab die Messung mit dem kleinen Instrument 54,6 bezw. 50,8 vH.

c) Das kleine Kalorimeter wurde hinter den großen Wasserbehälter geschaltet. Dabei ergaben sich geringere Abweichungen. Dieselben sind aus nachstehender Zusammenstellung zu entnehmen:

Großes Kalorimeter:	0,5	0,8	1,0	1,6	2,5	19,1 vH
Kleines » :	1,0	1,5	2,2	3,6	5,5	31,8 »

[1]) Knoblauch und Jakob a. a. O. S. 116.

[2]) Richter. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1906 S. 282.

[3]) Diese Beobachtung wurde durch meine Versuche, bei welchen sich das Vorhandensein von Wasser durch Temperatursenkung an den Thermoelementen anzeigte, vollauf bestätigt.

[4]) Denton, Transactions of the A. S. M. E. 1896 S. 175.

Aus den Versuchen a bis c zieht Denton folgenden Schluß:

Die Resultate ergaben, daß kleine Drosselkalorimeter immer einen beträchtlich höheren Betrag von Feuchtigkeit angeben, als tatsächlich im Dampf enthalten ist. Die Ursache ist darin zu suchen, daß sich Wasser an der Entnahmestelle abscheidet und mit in das Kalorimeter gerissen wird.

d) Eine weitere Untersuchung sollte feststellen, ob bei geringerer Feuchtigkeit unter $1^1/_2$ vH, welcher Prozentsatz bei guten Kesselanlagen nie überschritten wird, ebenfalls ein Abscheiden an der Entnahmestelle eintritt.

Zur Lösung dieser Frage wurde als Entnahmevorrichtung ein durch eine Stopfbüchse eingeführtes Rohr verwendet, ohne seitliche Bohrungen einfach innen offen endend, so daß dieses Rohr radial in dem Dampfrohr bewegt werden konnte, und zwar senkrecht von unten nach oben.

Dabei ergab sich, daß das Kalorimeter trocknen Dampf angab bei einer Entfernung der Oeffnung von der Rohrwandung von mehr als 1,75″. Bei geringerer Entfernung berechnete man aus den Angaben 35 bis 47 vH Feuchtigkeit. Die tatsächlich vorhandene Wassermenge war $^1/_3$ vH.

Aus diesen Untersuchungen läßt sich daher unzweifelhaft entnehmen, daß die kleinen Kalorimeter, selbst wenn sie an sich fehlerfrei wären, infolge der Unmöglichkeit, mit den vorhandenen Vorrichtungen eine richtige Dampfprobe zu entnehmen, unbrauchbar sind.

Jakobus[1]) hat eine andre Art der Messung mit kleinen Kalorimetern angegeben. Er verwendet 3 Kalorimeter nach Barrus, welche hintereinander an eine horizontale Dampfleitung angeschlossen sind, wobei für jedes Instrument eine andre Entnahmevorrichtung benutzt wird.

Das erste Kalorimeter, ein kombiniertes Abscheide- und Drosselkalorimeter, wird an der Rohrsohle angeschlossen, so daß das gesamte am Boden laufende Wasser in das Kalorimeter geführt wird. Das Entnahmerohr des zweiten Instrumentes ist von unten durch eine Stopfbüchse so in das Hauptrohr eingeführt, daß es von der Rohrsohle bis zum höchsten Punkt des Rohres verschoben werden kann. Das dritte Kalorimeter endlich besitzt eine der gebräuchlichen Entnahmevorrichtungen, ein mit vielen Bohrungen versehenes Rohr, welches vom Boden bis zum höchsten Punkt des Rohrquerschnittes reicht. Die Bohrungen beginnen jedoch erst $^3/_8$″ über der Rohrsohle.

Wie Denton[2]) in seiner Arbeit erwähnt, kann durch ein derartiges Rohr, wie es für das erste Kalorimeter in Anwendung kam, fast alle Feuchtigkeit aus dem Dampf entnommen werden, vorausgesetzt, daß letzterer vor der Entnahmestelle eine größere Strecke horizontal läuft. Das Wasser scheidet sich auf dieser Strecke durch seine Schwere selbst aus und läuft an der Rohrsohle weiter.

Das erste Kalorimeter hatte einen doppelten Zweck:

In dem Abscheider sammelte sich das gesamte am Boden fließende Wasser und konnte hier gemessen werden, das anschließende Drosselkalorimeter diente zur Eichung der Thermometer.

Jakobus bestimmt im Drosselkalorimeter jene Ueberhitzungstemperatur, welche trockengesättigter Dampf in der Expansionskammer hervorruft, und berücksichtigt bei dieser Art der Messung gleich die durch Strahlung usw. bedingten Verluste. Freilich ist die Definition »trockner Dampf«, welche der Autor gibt, nicht einwandfrei. Jakobus behauptet, daß nach angestellten Versuchen der in das Drosselkalori-

[1]) D. S. Jakobus, On determing the moisture in steam.

[2]) Denton, a. a. O.

meter gelangende Dampf als für praktische Zwecke trocken gelten kann, wenn bei einer Drosselöffnung von $^1/_8$" im Abscheider sich kein Wasser ansammelt. Jakobus rechnet dabei allerdings mit einem Fehlbetrag von ± 0,5 vH. Aber auch diese Fehlergrenzen müssen nach den im Folgenden mitgeteilten Versuchen des Verfassers als zu eng angesehen werden, da die Dampfgeschwindigkeit in der Hauptleitung, welche hier vollkommen unberücksichtigt bleibt, von außerordentlichem Einfluß auf den Feuchtigkeitsgehalt ist.

Mit dem zweiten und dritten Kalorimeter wird die Feuchtigkeit des Dampfstromes selbst bestimmt.

Zur Berechnung der Dampffeuchtigkeit in vH gibt Jakobus die Formel an:

$$\frac{18}{L}(N - T);$$

hierin bedeutet:

L die dem Dampfdruck entsprechende Verdampfungswärme,
N die bei trocken gesättigtem Dampf auf der Hochdruckseite beobachtete Ueberhitzungstemperatur auf der Niederdruckseite (Normal reading),
T die im zweiten oder dritten Kalorimeter abgelesene Temperatur.

Die Ableitung dieser Formel, die Jakobus in seiner Veröffentlichung nicht angibt, ist unter Verwendung der oben S. 11 und 12 in dieser Arbeit eingeführten Bezeichnungen folgende:

Die Gleichung der Wärmebilanz beim Drosselvorgang (unter der Voraussetzung, daß auf der Hochdruckseite feuchter Dampf vorhanden ist) lautet:

$$(1 - y)\, i_1 + y\, q_1 = i_2 + c_{pm}\,(t_2' - t_{2s}).$$

Unter der Annahme, daß trocken gesättigter Dampf das Kalorimeter passiert, geht dieselbe über in die Form:

$$i_1 = i_2 + c_{pm}\,(t_2 - t_{2s}),$$

wenn t_2 für diesen Fall die auf der Niederdruckseite herrschende Temperatur bezeichnet. Durch Subtraktion erhält man:

$$i_1\, y - y\, q_1 = c_{pm}(t_2 - t_2')$$

oder

$$y\,(i_1 - q_1) = c_{pm}(t_2 - t_2'),$$

daraus

$$y = \frac{c_{pm}}{r_1}(t_2 - t_2') \text{ kg in 1 kg Dampf}$$

oder

$$y = \frac{c_{pm}\,100}{r_1}(t_2 - t_2') \text{ in vH} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13).$$

Die Einfachheit der Berechnung der Feuchtigkeit bei dieser Methode hat etwas Bestechendes. Trotzdem erscheint diese Methode für die Praxis nicht sehr empfehlenswert, weil es erstens kaum möglich ist, den Apparat mit wirklich trocknem Dampf zu eichen, und weil zweitens die durchströmende Dampfmenge gemessen werden muß, um festzustellen, welchem Dampfquantum die im Abscheidekalorimeter abgenommene Wassermenge angehört.

Dabei hat man mit all den Fehlerquellen zu rechnen, die die Verwendung kleiner Kalorimeter und der zugehörigen Entnahmevorrichtungen im Gefolge hat. Außerdem ist es fraglich, ob in allen Fällen (bei verschiedenen Dampfgeschwindigkeiten usw.) wirklich alles Wasser durch das erste Entnahmerohr abgeleitet werden kann. Eine quantitative Bestimmung des an der Rohrsohle event. weiter fließenden Wassers ist bei der angegebenen Anordnung nicht mehr möglich.

In den nunmehr zu beschreibenden Versuchen des Verfassers wurde daher von Anbeginn auf die Entnahme kleiner Dampfproben verzichtet und das Augenmerk auf die Konstruktion eines Drosselkalorimeters gerichtet, das die ganze, eine Dampfleitung passierende Dampfmenge zu bewältigen imstande ist.

Die Durchführung der Versuche.

A) Vorversuche.

Die zu Anfang gewählte Versuchsanordnung mußte im Laufe der Untersuchung zwar wieder vollkommen verlassen werden, doch ist ihre Beschreibung deshalb notwendig, weil die Gründe, die zur Aufgabe der Experimente in dieser Richtung zwangen, wertvolle Beweise für die Richtigkeit der Ergebnisse der späteren Versuche bilden.

Nach dem oben Mitgeteilten können die Angaben eines Drosselkalorimeters nur dann als einwandfrei betrachtet werden, wenn es die folgenden Forderungen erfüllt:

1) die Niederdruckseite muß gegen den Uebergang von Wärme von der Hochdruckseite isoliert sein;
2) das Kalorimeter muß durch eine sorgfältige Isolation gegen den Wärmeverlust nach außen geschützt sein;
3) es muß vor der Meßstelle der Temperatur auf der Niederdruckseite vollkommene Trocknung des Dampfes eingetreten sein;
4) Vorrichtungen zur Entnahme einer Dampfprobe sind nur unter Berücksichtigung der später angegebenen Vorsichtsmaßregeln zu verwenden;
5) es muß aus theoretischen Gründen dafür gesorgt sein, daß an der Temperaturmeßstelle der Niederdruckseite keine bevorzugte Bewegungsrichtung des Dampfes existiert.

Da von den erwähnten Drosselkalorimetern keines diese Forderung völlig befriedigt, so wurde eine Neukonstruktion desselben vorgenommen. Eine systematische Untersuchung über die Temperaturverteilung im Expansionsraume mußte dabei feststellen, ob und an welcher Stelle in diesem Raume vollkommene Trocknung und homogene Ueberhitzung eingetreten war.

Die ersten Versuche sollten bezwecken, die Angaben eines Drosselkalorimeters für große Dampfmengen, das unter Berücksichtigung der bei Versuchen von Peabody, Unwin[1]), Denton, Carpenter und Griesmann[2]) gemachten Erfahrungen konstruiert worden war, zu vergleichen mit den durch elektrische Trocknung und Ueberhitzung erhaltenen Resultaten.

Wie schon eingangs erwähnt, ist diese Art der Feuchtigkeitsbestimmung nur für kleine Dampfmengen durchzuführen. Aus diesem Grunde wurde der zu messende Dampf im Verhältnis 1 : 9 in 2 Teile geteilt, wovon 1 Teil dem elektrisch geheizten Ueberhitzer und 9 Teile dem Drosselkalorimeter zugeführt wurden.

Der Dampf wurde einem Walzenkessel von 60 qm Heizfläche entnommen und durch ein zuerst 12 m horizontal, dann 5 m vertikal laufendes Rohr dem Verteiler zugeführt, der die eben erwähnte Teilung des Dampfstromes im Verhältnis 1 : 9 vornahm, nachdem zuvor am Ende der horizontalen Leitung das an der Rohrsohle fließende Wasser durch einen einfachen Wasserabscheider, eine zwischen 2 Flanschen

[1]) Unwin, Engineering 1895.

[2]) Griesmann, Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1904 Heft 13.

geklemmte Kupferscheibe mit exzentrischer Bohrung abgenommen worden war, s. Fig. 7.

Die Konstruktion des Verteilers zeigt Fig. 8. Derselbe stellt sich im wesentlichen als eine Erweiterung der Rohrleitung dar, in welcher sich die Entnahmevorrichtung befindet.

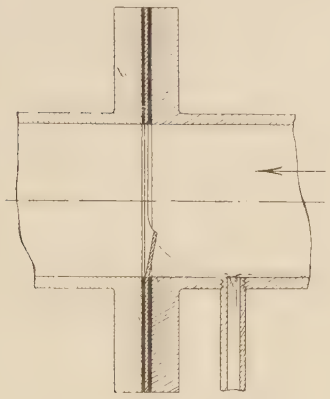

Fig. 7. Kupferscheibe als Wasserabscheider.

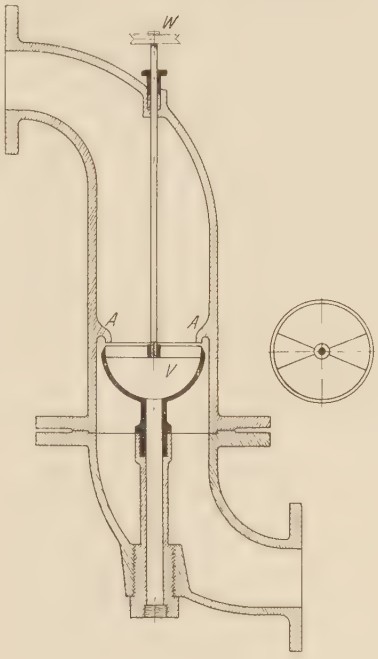

Fig. 8. Umlaufende Dampfentnahmevorrichtung. 1 : 10.

Wie besonders die Versuche von Denton[1]) ergaben, sind alle bisher verwendeten Entnahmevorrichtungen ungeeignet zum Abziehen von Dampfproben, da sie, weil fest im Dampfrohr angebracht, immer Dampf aus demselben Teil des Rohrquerschnittes liefern, der nur in den seltensten Fällen und nur unter Einhaltung mehrerer Bedingungen die mittlere Feuchtigkeit des Dampfes aufweist.

Aus diesem Grunde wurde die Entnahmevorrichtung bei vorliegenden Versuchen rotierend angeordnet, so daß Dampf aus allen Teilen des Querschnittes fortlaufend dem Ueberhitzer zugeführt wurde. Diese Vorrichtung ähnelt einem am Ende breitgequetschten Rohr, die Rohrmündung ist dabei von doppelsektorenförmigem Querschnitt und endet in messerscharfen Rändern. Das untere zylindrische Ende ist in eine Büchse eingeschliffen, welche konaxial in der Rohrerweiterung angebracht ist. Die Querschnitte der Mündung der Abnahmevorrichtung und des restierenden Rohrquerschnittes verhalten sich wie 1 : 9, d. h. wie die durch sie fließenden Dampfquantitäten. Durch eine aus der oben gekrümmten Rohrerweiterung geführte Welle wird die Vorrichtung in langsame Rotation versetzt.

Der elektrische Ueberhitzer, welcher sozusagen als Normalinstrument bei der Prüfung verwendet wurde, ist derselbe, der bereits zu den Versuchen zur Bestimmung der spezifischen Wärme von überhitztem Wasserdampf von Knoblauch und Jakob benutzt wurde, und ist in deren Arbeit[2]) genau beschrieben. Es erübrigt sich hier, auf die Einzelheiten der Konstruktion näher einzugehen, zumal die Ver-

[1]) Denton, a. a. O.

[2]) Knoblauch und Jakob, a. a. O.

suche in dieser Richtung nicht den gewünschten Erfolg brachten. Im Prinzip bestand der Ueberhitzer aus einer Rohrspirale, welche sich in einem elektrisch geheizten Oelbad befand, das sorgfältig gegen Wärmeabgabe nach außen isoliert war. Die Temperatur des Dampfes wurde beim Eintritt und Ausgang der Rohrspirale genau gemessen und aus der zugeführten elektrischen Energie die vom Dampf aufgenommene Wärmemenge berechnet.

Hinter jeden der beiden Apparate (Ueberhitzer und Drosselkalorimeter) war ein Oberflächenkondensator geschaltet, der die, den Apparat durchströmende Dampfmenge festzustellen gestattete, wodurch die Möglichkeit gegeben war, das schon erwähnte Verhältnis 1:9 der Dampfmengen einzustellen[1]). Die den Ueberhitzer passierende Menge mußte dabei mit besonderer Genauigkeit gemessen werden, da bei der Berechnung des Wassergehaltes dieser Wert eine wesentliche Rolle spielt; es wurde daher zu diesem Zweck dieselbe Anordnung getroffen die sich schon bei den c_p-Versuchen vorzüglich bewährt hat: Das Kondensat wird, bevor es in das Meßgefäß gelangt, in eine gewöhnliche Bürette[2]) unten seitlich eingeleitet und fließt durch das nach abwärts führende Rohrstück ab. Jeder Standhöhe des Flüssigkeitsspiegels in der Bürette entspricht eine bestimmte Ausflußmenge. Man ist dadurch in der Lage, durch Konstanthalten des Wasserspiegels im Kondensator und in der Bürette auch die durchströmende Dampfmenge konstant zu halten.

B) Die Durchbildung des Drosselkalorimeters.

Das Drosselkalorimeter machte von den ersten Vorversuchen bis zur endgültigen Prüfung und Anwendung des Instrumentes verschiedene Wandlungen durch.

Die zuerst verwendete Konstruktion des Kalorimeters ist aus Fig. 9 ersichtlich. Durch den Krümmer *A* wird der Dampf aus dem Verteiler dem zylindrischen Holzkörper *B* zugeführt, in welchen die Drosselstelle eingebaut ist. Holz wurde

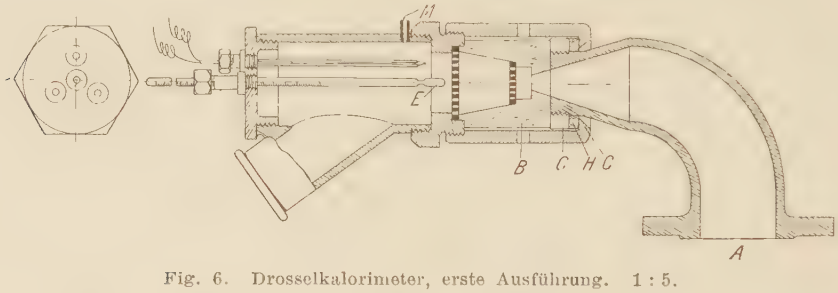

Fig. 6. Drosselkalorimeter, erste Ausführung. 1 : 5.

deshalb gewählt, weil, wie schon wiederholt erwähnt, bei den Drosselversuchen vermieden werden muß, daß Wärme nach außen abströmen kann und daß ein Wärmeübergang von der Hochdruck- zur Niederdruckseite stattfindet. Aus demselben Grunde wurden auch die Flanschen *C* durch einen zwischengelegten Holzring *H* voneinander isoliert. Auch bei den später verwendeten Schraubenbolzen, Fig. 15, ist die Wärmeleitung durch übergeschobene Holzbüchsen nach Möglichkeit verringert.

Die einwandfreie Verwendung der Temperaturangaben des Drosselkalorimeters setzt voraus, daß ebenso, wie bei den klassischen Versuchen von Thomson und Joule über die Abkühlung der Luft beim Durchströmen durch eine Drosselstelle,

[1]) Der größere Kondensator ist auf der Photographie, Fig. 29, hinten sichtbar.

[2]) Eine solche Bürette *B* ist in Fig. 17 zu sehen.

der Dampf weder vor noch hinter derselben eine einseitig gerichtete Bewegung besitzt. Die Drosselstelle bestand daher nicht aus einer einfachen kleinen Oeffnung, sondern war dem Wattepfropf von Thomson-Joule nachgebildet, bei dem die Drosselstelle aus außerordentlich vielen und verschieden gerichteten Oeffnungen besteht und daher der ausströmende Dampf keine bevorzugte Bewegungsrichtung besitzen kann.

Als Drosselkörper wurde zuerst Glaswolle, dann Baumwolle verwendet, welche in den konisch ausgedrehten Teil der Holzbüchse zwischen zwei mit vielen Bohrungen versehene Messingscheiben eingepreßt war. Direkt hinter der Drosselstelle ist die Meßstelle für Druck M und Temperatur E. Der Druck wird durch ein einfaches Quecksilbermanometer, die Temperatur durch ein in $^1/_5{}^0$ geteiltes Quecksilberthermometer und drei im Kreis um dasselbe angeordnete Thermoelemente (Eisen, Konstantan-Elemente), welch letztere empirisch geeicht waren, gemessen. Die Messung der Thermospannung geschah hierbei direkt durch Ablesung der Ausschläge eines Galvanometers, wobei ^{0}C direkt und $^1/_{10}{}^0$ schätzungsweise bestimmt werden konnten.

Die ersten Versuche zeigten jedoch bereits, daß das Kalorimeter in der beschriebenen Form nicht brauchbar ist. Die Glaswolle erwies sich als gänzlich ungeeignet für die Drosselstelle, da sie im Lauf des Versuches zerfiel und am Schluß

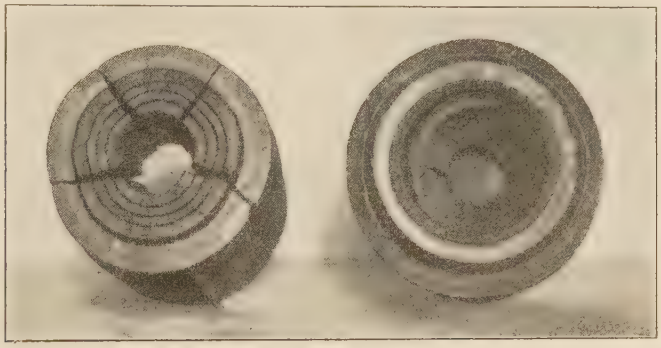

Fig. 10 und 11.

nur mehr eine pulverförmige Masse bildete. Auch die dann verwandte Baumwolle blieb während des Versuches nicht gleichmäßig dicht, so daß durch die fortwährende Aenderung des Drosselwiderstandes auch eine fortwährende Aenderung der Dampfmenge bedingt war. Außerdem bildeten sich in dem Drosselkörper Kanäle, durch welche das Wasser auf die Niederdruckseite in ungleichmäßiger Verteilung bis auf größere Entfernung hinter der Drosselstelle gelangen konnte, wo es dann zur Verdampfung kam. Dies äußerte sich dann dadurch, daß bei der Temperaturmessung einige Thermoelemente Sättigungstemperatur zeigten, während die andern eine beträchtliche Ueberhitzung aufwiesen.

Die Verwendung von Holz zur Aufnahme der Drosselstelle erwies sich als ein weiterer Mangel. Pockholz und Ebenholz, das sich bei den Versuchen von Griessmann gut bewährt haben soll und das seiner geringen Wärmeleitfähigkeit wegen allen andern Materialien vorzuziehen gewesen wäre, zeigte sich bei der Verwendung von nassem Dampf als unbrauchbar, da es nach jedem Versuch derartige Risse bekam, daß seine Weiterverwendung ausgeschlossen war. Fig. 10 zeigt einen derartigen deformierten Holzkörper. Auch warm auf den Holzkörper aufgezogene Stahlringe konnten die Haltbarkeit nicht wesentlich vergrößern. In Fig. 11 ist ein solcher Körper dargestellt, welcher zu 2 Versuchen benutzt worden war.

Bei den weiteren Versuchen wurde daher die Holzbüchse durch eine solche aus Porzellan ersetzt, deren Innenraum zylindrisch ausgeführt war. Durch letztere Maßnahme sollte vermieden werden, daß der Wattepfropf, der durch den, auf ihm lastenden Dampfdruck stark zusammengepreßt wird, an der Peripherie eine geringere Dicke erhält als in der Mitte, s. Fig. 12. Der Wattepfropf wurde durch mehrere zwischengelegte Drahtsiebe unterteilt, um eine Kanalbildung möglichst zu vermeiden. Die Dicke der Watteschicht konnte durch eingelegte Messingringe *D*, Fig. 13, variiert werden.

Fig. 12 und 13.

Die Anordnung von 3 feststehenden Thermoelementen erwies sich ebenfalls als unzulänglich für die Untersuchung des Temperaturverlaufes hinter der Drosselstelle. Es erschien daher notwendig, eine Einrichtung zu treffen, mittelst welcher möglichst jeder Punkt der Expansionskammer auf seine Temperatur geprüft werden konnte. Zur Erreichung dieses Zweckes wurden zwei Thermoelemente benutzt, von denen das eine zentral, das andre exzentrisch in dem zylindrischen Expansionsraum angebracht war. Beide Elemente sind durch Stopfbüchsen durch den Deckel der Kammer hindurchgeführt, der sich selbst wieder durch Stopfbüchsendichtung zentrisch zur Achse der Expansionskammer drehen läßt, s. Fig. 15. Durch die Führung der in dünne Stahlrohre eingekitteten Elemente durch kleine Stopfbüchsen ist eine axiale Verschiebung derselben möglich, durch die Drehbarkeit des Deckels die Messung an verschiedenen Punkten jeden Querschnittes. Die jeweilige Stellung der Elemente kann durch an den Röhrchen angebrachte Marken und durch eine auf dem Deckel eingeritzte Kreisteilung bestimmt werden.

Trotz dieser bei der Verbesserung der Drosselstelle angewandten Vorsichtsmaßregeln waren doch in den einzelnen Querschnitten hinter der Drosselstelle keine homogene Ueberhitzung erzielt, es waren in ihnen vielmehr Temperaturdifferenzen bis zu 14° C zu verzeichnen.

Da sich außerdem die Regulierung der Dampfmenge durch die Veränderung der Dicke der Drosselschicht zu umständlich und doch wenig zweckmäßig zeigte, so wurde versucht, die Drosselung durch Messingscheiben mit entsprechenden Bohrungen, hinter welche zur Durchwirbelung des Dampfes, bevor er an die Meßstelle gelangt, mehrere Drahtsiebe gesetzt wurden, zu bewerkstelligen.

Der angestrebte Zweck, eine homogene Temperaturverteilung an der Meßstelle zu erzielen, wurde jedoch auch dadurch nicht erreicht.

Bei der weiteren Ausbildung des Drosselkalorimeters war folgende Ueberlegung maßgebend: Die schon mehrfach erwähnte Tatsache, daß sich nur sehr schwer homogen überhitzter Dampf herstellen läßt, und daß sich tropfbar flüssiges Wasser in überhitztem Dampf lange Zeit halten kann, findet darin seine einfache Erklärung, daß 1) der Wärmeübergang von Dampf auf Wasser ein verhältnismäßig schlechter, 2) die Verdampfungswärme des Wassers sehr groß und 3) die Oberfläche der Wassertröpfchen sehr klein ist. Somit bedarf es eben einer gewissen Zeit, bis die zur Verdampfung der Tröpfchen nötige Wärme durch deren Oberfläche hindurch-

getreten ist. Dagegen ist eine schnellere Verdampfung von vornherein zu erwarten, wenn man durch Gegenblasen des feuchten Dampfes gegen einen festen Körper nach Möglichkeit für die Abscheidung der Wassertröpfchen an der Oberfläche des festen Körpers sorgt und nun von diesem aus die zur Verdampfung nötige Wärme an das Wasser übergehen läßt. Denn es ist in diesem Fall sowohl der Wärmeübergang besser, als auch die Wasseroberfläche größer.

Aus diesem Grunde war hinter der Drosselscheibe ein schraubenförmiges Kupferblech eingebaut, welches den Dampfstrom zu vielmaligem Richtungswechsel und Aufprallen auf das Blech zwingt. Das hierbei auf demselben abgeschiedene Wasser verdampft dann infolge des relativ guten Wärmeüberganges.

Die zuerst eingebaute Kupferschnecke hatte 3 Windungen. Zwanzig dahintergeschaltete Drahtsiebe sorgten für die Mischung des Dampfes vor der Meßstelle und verwandelten somit, wie der Wattepfropf von Thomson-Joule, die geordnete Bewegung des Dampfes in eine ungeordnete. Fig. 14 zeigt die einzelnen Teile der Drosselstelle (Porzellanzylinder mit Drosselscheibe, Kupferschnecke und Messingsieb).

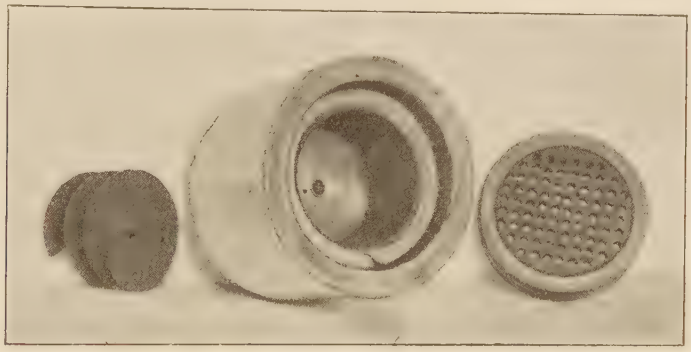

Fig. 14.

Die vorstehend aufgeführten Maßnahmen hatten den Erfolg, daß die Temperaturverteilung im Expansionsraum bereits 3 cm hinter der Drosselstelle nur mehr eine Maximaldifferenz von 2,8° aufwies. Die maximale Abweichung vom Mittelwert betrug hierbei 1,8°, was einem event. Fehler von 0,3 vH entsprechen würde.

Bei Feuchtigkeitsgraden über 1,2 vH trat jedoch wieder größere Temperaturdifferenz auf, aus welchem Grunde die Kupferschnecke und das sie umschließende Porzellanrohr auf die doppelte Länge (20 cm) vergrößert wurden, s. Fig. 15. Um die, durch die größeren Dimensionen bedingten Wärmeverluste zu vermindern, erhielt das Porzellanrohr einen Mantel aus loser Schafwolle *J*, welcher durch ein Drahtnetz außen zusammen gehalten wurde. Das Drahtnetz hatte außerdem den Zweck, bei einem eventuell eintretenden Bruch des Porzellanrohres das Abspringen von Porzellansplittern und damit die Verletzung der in der Nähe des Instrumentes befindlichen Personen zu verhindern. Diese Maßnahme erwies sich auch als notwendig und zweckentsprechend, da während der Versuche das Porzellanrohr tatsächlich wiederholt gesprengt wurde.

Für die später durchzuführende Prüfung der Wasserabscheider wurde noch bei der endgültigen Konstruktion des Drosselkalorimeters statt der Drosselscheiben, welche bei jeder Aenderung der Dampfgeschwindigkeit hätten ausgewechselt werden müssen, zur Drosselung des Dampfes ein kleines Ventil *V* eingesetzt, das durch eine zur Vermeidung einer Wärmeüberleitung möglichst dünne Welle *W* bewegt

werden konnte. Die geringe Dimensionierung der Welle ermöglichte die gewählte Anordnung, wonach die Welle beim Schließen des Ventiles auf Zug beansprucht wird.

Der Temperaturverlauf hinter der Drosselstelle ergab mit dieser Konstruktion des Kalorimeters nunmehr Differenzen bis rd. 1,6° in den einzelnen Querschnitten und einer Abweichung von rd. 0,9° vom Mittelwert.

Die Untersuchung des Temperaturverlaufes in der Expansionskammer in der Richtung des Dampfstromes ergab von den Mischsieben bis etwa 3 cm dahinter ein rasches, ziemlich unregelmäßiges Sinken der Temperatur, das auf noch auftretende

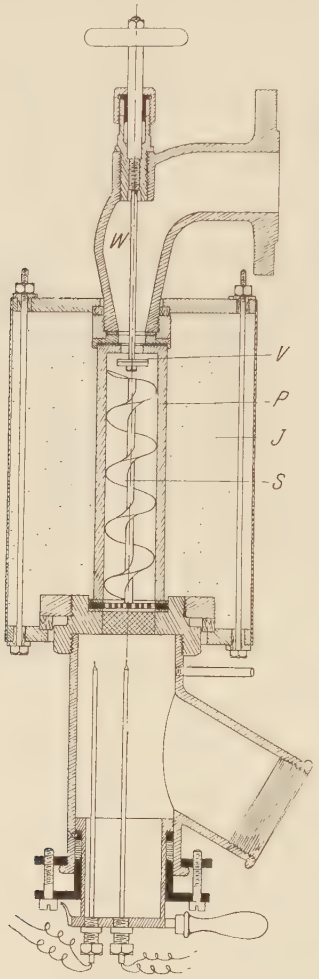

Fig. 15. Verbessertes Drosselkalorimeter. 1 : 7,5.

Verdampfungserscheinungen hinwies; von hier ab zeigte der Temperaturverlauf ein langsames stetiges Abfallen entsprechend der Wärmeabgabe nach außen.

Da diese Erscheinung auch bei verschiedenen Dampfgeschwindigkeiten zutraf, so wurde die Temperaturmessung in der Folge nur mehr in dem einem Quer schnitt (30 mm hinter den Mischungssieben) und zwar an 7 Punkten vorgenommen.

Das Kalorimeter konnte in diesem Zustande nunmehr als einwandfrei gelten und man konnte behaupten, daß die Angaben desselben von den Effektivwerten nur noch sehr wenig verschieden sein konnten.

Der Vergleich mit den durch die Ueberhitzermethode erhaltenen Zahlen ergab jedoch anfänglich Abweichungen bis rd. 100 vH. Es war daher naheliegend, den Fehler in der Entnahme der Dampfprobe zu suchen, was sich dann auch bestätigte. Der als einwandfrei angesehene rotierende Verteiler wirkte als Wasserabscheider und zwar in der Weise, daß der rotierende Teil des Apparates bei seiner Bewegung das Wasser von den Rohrwandungen $A—A_1$, Fig. 8, welche über der doppelsektorenförmigen Oeffnung vorsprangen, abstreifte und in den Ueberhitzer führte. Den Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung lieferte ein Versuch, bei welchem die rotierende Entnahmevorrichtung, so weit es der vorhandene Raum erlaubte, tiefer gesetzt wurde. Dadurch wurde die Differenz von 100 auf 50 vH verringert. Alle Versuche, diese Differenz noch weiter herabzudrücken, scheiterten jedoch. Es erscheint daher wahrscheinlich, daß bei der Rotation des Apparates an den Rändern der Entnahmevorrichtung Wasser aus dem Hauptdampfstrom abgeschieden wird, das also eigentlich gar nicht der Dampfprobe angehört, aber von dem Dampfstrom mit in die Entnahmevorrichtung geführt wird, wie sich das bereits bei den Versuchen mit kleinen Kalorimetern ergeben hat [1]).

Es wurde daher diese Entnahmevorrichtung ausgeschaltet und an ihre Stelle ein sogenanntes Hosenrohr, d. i. ein gabelförmiges horizontales Rohrstück gesetzt, welches die Teilung des Dampfstromes in zwei gleiche Teile bewirken sollte. Die eine Hälfte wurde dem Drosselkalorimeter, die andre dem Ueberhitzer zugeführt. Bei genauer Horizontierung dieser Vorrichtung glaubte man annehmen zu können, daß der Dampf in beiden Zweigen denselben Zustand besitzen würde, zumal, wenn unmittelbar vor der Verteilungsstelle das an der Rohrsohle fließende Wasser durch einen einfachen Wasserabscheider, s. Fig. 7, abgenommen wurde. Bei den Versuchen mit dieser Anordnung zeigten sich jedoch wieder solche Unterschiede, daß es keinem Zweifel unterliegen kann, daß eine Verteilung des Dampfes oder eine Entnahme von Dampfproben nicht möglich ist, ohne daß sich der Zustand des Dampfes dabei ändert.

Ganz unbedeutende Unebenheiten der Rohrwandungen, minimale Unsymmetrie der beiden Zweigleitungen und dadurch bedingte Richtungs- und Geschwindigkeits-Aenderungen scheinen die Ursache zu sein. Wie nämlich die späteren Versuche an Wasserabscheidern bewiesen, ist nur ein geringer Prozentsatz des im Dampf enthaltenen Wassers im Dampf suspendiert. Ein großer Teil läuft an der Rohrsohle, der übrige Betrag besteht aus dem an den Rohrwandungen kondensierten Wasser, das unter Umständen auf eine kurze Strecke vom Dampf mitgerissen wird und sich entweder durch die eigene Schwere oder bei Richtungsänderungen durch das Anprallen an die Rohrwandungen wieder abscheidet.

Es ist danach erklärlich, daß nirgends in der Dampfleitung ein homogener Zustand in bezug auf den Wassergehalt anzutreffen ist und daß alle Bestrebungen, der Leitung eine Dampfprobe zu entnehmen, welche genau denselben Feuchtigkeitsgrad besitzt, wie die Gesamtdampfmenge unbedingt scheitern mußten.

Auf Grund dieser Erfahrungen wurde daher von einer Eichung des Kalorimeters durch Vergleich mit dem Ueberhitzungskalorimeter abgegangen und eine neue Art der Prüfung gewählt, die in nachstehenden Zeilen beschrieben ist.

Die Prüfung des Drosselkalorimeters.

Die Prüfung des Kalorimeters erstreckte sich erstens auf die Untersuchung des Expansionsraumes um festzustellen, ob und wo in demselben eine Homogenität des Dampfes besteht und zweitens auf die Bestimmung der Genauigkeit des Kalorimeters durch kalorimetrisch meßbare Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes.

[1]) Denton, Transactions A. S. M. E. 1896 S. 175

a) Prüfung auf Homogenität.

Dieselbe wurde in der Weise vorgenommen, daß sowohl das in der Achse des Kalorimeters befindliche, wie das exzentrisch angeordnete Thermoelement in verschiedener Entfernung von der Drosselstelle gebracht und dort die Thermokraft festgestellt wurde. Das exzentrisch angebrachte Thermoelement wurde dabei in 6 verschiedenen Punkten eines jeden Querschnittes beobachtet. Auf vollkommene Trocknung und homogene Ueberhitzung war dann zu schließen, wenn die Thermoelemente an allen Punkten eines Querschnittes dieselbe Temperatur angaben.

b) Prüfung auf Genauigkeit.

1) Prinzip der Prüfung.

Da sich aus den Vorversuchen ergeben hatte, daß eine Prüfung des Kalorimeters nach der Ueberhitzermethode nicht durchführbar ist, so wurde ein andrer Weg beschritten. — Die ganze Dampfmenge, der durch mehrere vorgeschaltete Wasserabscheider der Hauptteil der Feuchtigkeit entzogen worden war, gelangte in das Kalorimeter, wo aus der Temperatur der Niederdruckseite seine Feuchtigkeit bestimmt wurde. Die Richtigkeit der Bestimmung dieser unbekannten Feuchtigkeit wurde dadurch kontrolliert, daß sie in meßbarer Weise verändert wurde. Zu diesem Zwecke war in dem Teil der Dampfleitung zwischen dem letzten Wasserabscheider und dem Drosselkalorimeter eine kleine Kondensationsvorrichtung eingebaut, bestehend in einem vom Wasser durchflossenen Rohr, s. Fig. 16. Aus der Menge des hindurchfließenden Kühlwassers und seiner Ein- und Austrittstemperatur läßt sich die durch diesen Kondensator aus dem Dampf in der Leitung niedergeschlagene Wassermenge nach der Formel berechnen:

$$M = \frac{m\,(t' - t'')}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (14),$$

wobei

M = Kondensatmenge (kg/st).
m = Menge (kg/st)
t'' = Eintrittstemperatur (° C) } des Kühlwassers.
t' = Austrittstemperatur (° C)
r = dem jeweiligen Kesseldruck entsprechende Verdampfungswärme.

Die hierdurch hervorgerufene Aenderung Δy der Feuchtigkeit in vH berechnet sich mit Hilfe der im großen Kondensator gemessenen stündlich durchgeströmten Dampfmenge G mit Hilfe der Gleichung

$$\Delta y = \frac{m\,(t' - t'')\,100}{r\,G} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (15).$$

Die Prüfung des Drosselkalorimeters findet nun in der Weise statt, daß für verschiedene Werte des Druckes, der Dampfgeschwindigkeit und der ursprünglichen Feuchtigkeit festgestellt wird, ob der nach der letzten Gleichung berechnete Wert der zusätzlichen Feuchtigkeit Δy übereinstimmt mit demjenigen, der sich aus den Ablesungen des Drosselkalorimeters ergibt.

Eine derartige Kondensationsvorrichtung gestattet allerdings nur eine geringe Veränderung der zusätzlichen Dampffeuchtigkeit, da dieselbe nur durch Veränderung der Geschwindigkeit des Kühlwassers und der dadurch erzielten Aenderung des Wärmeüberganges auf dasselbe hervorgebracht werden kann. Aus diesem Grunde ist auch die Aufstellung einer gewöhnlichen Eichkurve nicht in der Weise möglich, daß man von einem Mindestbetrage der Feuchtigkeit ausgehend, dieselbe durch

kalorimetrisch bestimmte Wärmeentziehung bis zu der oberen Grenze des Meßbereiches des Kalorimeters anwachsen läßt.

Zum Zweck der graphischen Auswertung der Eichresultate wurde daher folgendermaßen verfahren:

Der ersten Ablesung des Drosselkalorimeters φ_0 (ohne Anwendung der Kondensationsvorrichtung) entsprach die zusätzliche Feuchtigkeit 0,

einer zweiten Ablesung des Kalorimeters φ_1, die zusätzliche Feuchtigkeit Δy_1,
einer dritten Ablesung φ_2 die zusätzliche Feuchtigkeit Δy_2 usw.

Trägt man dann in einem rechtwinkligen Koordinatennetz, unter Zugrundelegung derselben Einheiten für Abszissen und Ordinaten, die mit dem Drosselkalorimeter bestimmte Gesamtfeuchtigkeit als Abszisse, die mit der Kondensationsvorrichtung gemessene Zusatzfeuchtigkeit als Ordinate ein, so müßten bei Ausschluß aller

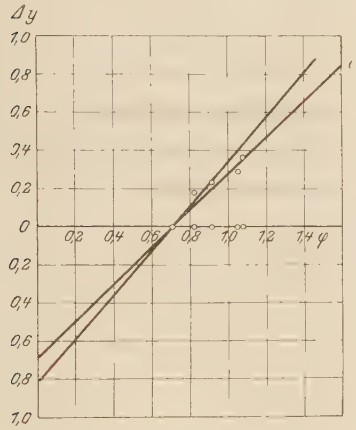

Fig. 16.
Eichung des Drosselkalorimeters. 2 at.

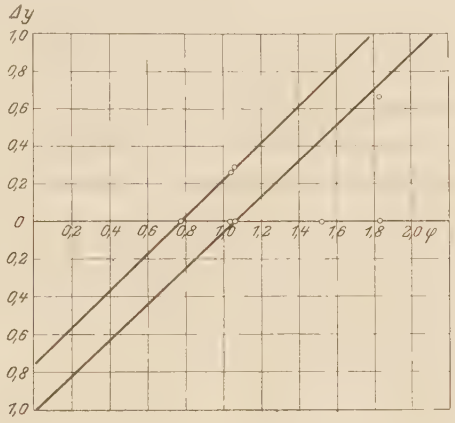

Fig. 17.
Eichung der Drosselkalorimeters. 4 at.

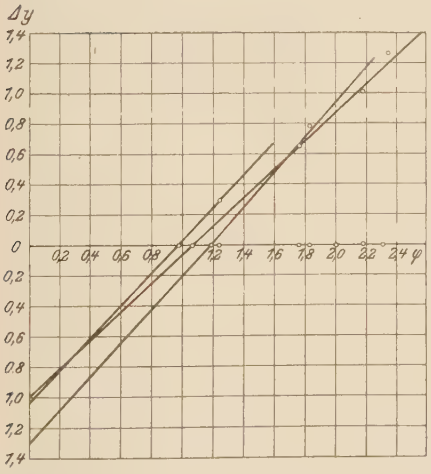

Fig. 18. Eichung des Drosselkalorimeters. 6 at.

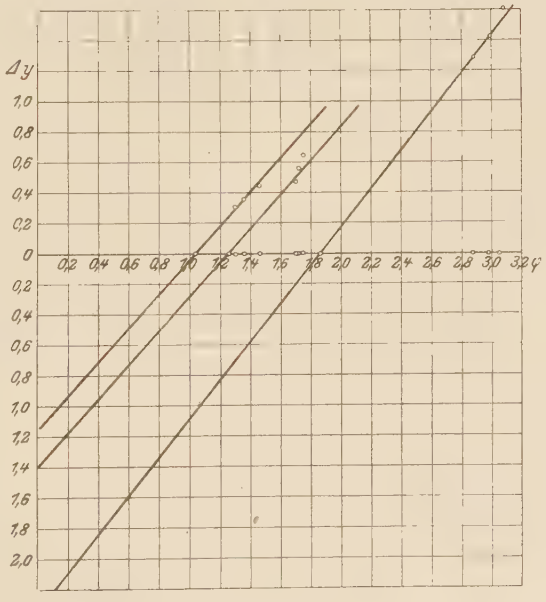

Fig. 19. Eichung des Drosselkalorimeters. 8 at.

Fehler die in einer Beobachtungsreihe erhaltenen Punkte auf einer geraden Linie liegen, die unter 45° C gegen die Achsen geneigt ist. Die etwaige Abweichung der erhaltenen Linie von der unter 45° C geneigten Geraden gibt einen Maßstab für die Genauigkeit des Drosselkalorimeters und läßt Konstruktionsfehler desselben erkennen.

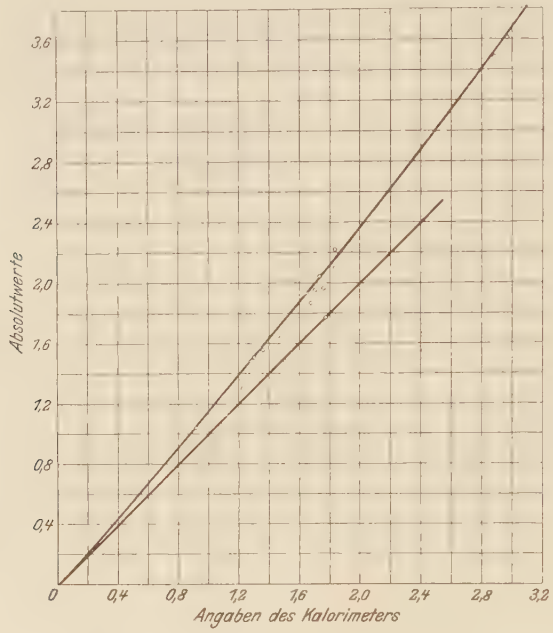

Fig. 20 Eichung des Drosselkalorimeters.

Hat man für verschiedene Drucke, Dampfgeschwindigkeiten und Feuchtigkeitsgrade eine Anzahl von Beobachtungsreihen angestellt, hat man also eine Anzahl solcher graphischer Darstellungen erhalten, vergl. Fig. 16 bis 20, so lassen sich dieselben in ein einziges Diagramm übertragen, wenn man sämtliche Kurven parallel zu sich bis zum Durchgang durch den Koordinatenanfangspunkt verschiebt. Das so erhaltene Diagramm, vergl. Fig. 20, stellt die Eichkurve des Drosselkalorimeters dar.

2) Versuchsanordnung, Fig. 21 und 22.

Der Dampf gelangt von dem vertikalen Teil der Rohrleitung, nachdem er zwei Wasserabscheider, von der in Fig. 7 abgebildeten Form passiert hat, in ein 3 m langes, horizontal geführtes Rohr, dessen eines Ende mit großem Radius rechtwinklig umgebogen ist. An dies Ende schließt sich das Kalorimeter an.

In das andre Ende, das nach dem Kessel zu liegt, ist die oben erwähnte kleine Kondensationsvorrichtung gebaut, die in nachstehendem beschrieben sei, Fig. 21.

In dem Dampfrohr befindet sich axial angebracht ein kleines Messingröhrchen (4 mm lichte Weite und 10 cm Länge). Diesem wird nach dem Gegenstromprinzip Wasser von oben her zugeführt, das am andern Ende wieder nach oben abgeleitet wird. Die Temperatur des ein- und austretenden Wassers kann durch geeichte Quecksilberthermometer festgestellt werden. Dabei war zu beachten, daß das, die Eintrittstemperatur messende Thermometer nicht durch die von dem Dampfrohr auf

das Wasserrohr überströmende Wärmemenge beeinflußt wurde. Dies konnte vermieden werden, indem man die Meßstelle τ_1 in angemessener Entfernung vom Dampfrohr anbrachte und dafür Sorge trug, daß das eintretende Kühlwasser Umgebungstemperatur besaß und daher auf dem Weg von der Meßstelle bis zum Dampfrohr keine Wärme aus der Luft aufnehmen konnte. Eine Eisenrohrschlange, welche das

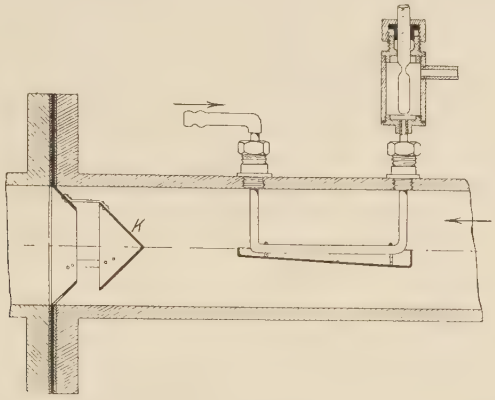

Fig. 21. Kondensationsvorrichtung zur Drosselkalorimeter-Eichung. 1 : 5.

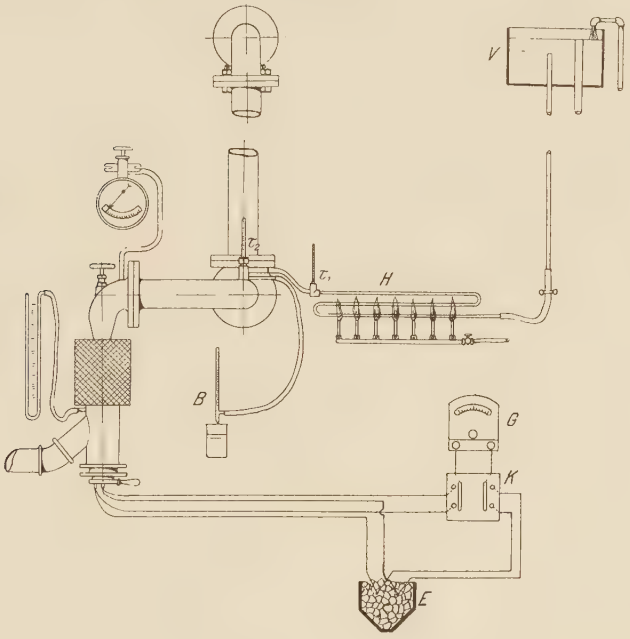

Fig. 22. Eichung des Drosselkalorimeters (Versuchsanordnung). 1 : 20.

der städtischen Wasserleitung entnommene Wasser zuerst passieren mußte, sorgte hierfür, indem das Wasser sich in derselben bei geringen Geschwindigkeiten selbst auf die Umgebungstemperatur erwärmte, während es bei größeren Geschwindigkeiten durch Gasheizung H erwärmt werden konnte, s. Fig. 22.

Die Messung der die Kondensationsvorrichtung durchströmenden Wassermenge, welche natürlich mit großer Genauigkeit festgestellt werden mußte, geschah durch Wägung. Damit sich die sekundlich durchfließende Wassermenge während der Prüfung nicht änderte, wurde das Wasser einem Ueberlaufbecken V entnommen. Zur Kontrolle der Unveränderlichkeit der Wassergeschwindigkeit war an der Aus-

trittstelle eine Bürette B verwendet, wie bei der Kondensatmessung bei der Ueberhitzermethode. Mittels eines Quetschhahnes mit Schrauben geringer Steigung, der zwischen V und H angebracht war, wurde der Wasserspiegel in der Bürette konstant gehalten.

Das Kondensat, das sich in Tropfen an der kalten Kondensationsröhre ansetzt, kühlt sich dabei unter die Sättigungstemperatur des Dampfes ab. Um diese Unterkühlung wieder aufzuheben, ist dicht unter dem Röhrchen, Fig. 21, eine gegen die Damprichtung schwach geneigte Kupferschale angebracht, in welcher sich das abtropfende Kondensat sammelt, auf die Sättigungstemperatur erwärmt, um dann von dem Dampfstrom mitgerissen zu werden[1]). Für den Fall, daß die Erwärmung bis zur Sättigungstemperatur in der Schale noch nicht erfolgt wäre, geschieht dies durch einen Kupfertrichter K, welcher sich dem Dampfstrom entgegenstellt, und durch die oben, S. 30, erwähnten Biegung des Dampfleitungsrohres. Beide Vorkehrungen verfolgen denselben Zweck, das Wasser zu zwingen, an die Rohrsohle oder Wandung zu gehen, um sich dort unter Hervorrufung von Kondensationserscheinungen noch vollends auf Sättigungstemperatur zu erwärmen.

In Fig. 22 ist noch die Anordnung der thermoelektrischen Messung angegeben. G bezeichnet das Galvanometer, E das Eisgefäß für die 0 Punkt-Lötstelle und K den Umschalter für die beiden Elemente.

c) Prüfungsresultate.

ad a) Die Resultate von zwei derartigen Prüfungen auf Homogenität[2]) bei Dampfgeschwindigkeiten 7 und 14 m/sk sind in Zahlentafel 1 eingetragen.

In der ersten Reihe ist die Entfernung L der Temperatur-Meßstelle von der Drosselstelle in cm eingetragen. Die folgenden 6 Reihen enthalten die Temperaturen von 6 je um 60° von einander abstehenden Stellen des Querschnittes; dieselben sind aus den Galvanometerablesungen des exzentrisch gelagerten äußeren Thermoelementes mit Hilfe der Eichkurve bestimmt. Die nächste Reihe enthält die mit dem mittleren Thermoelement bestimmte Temperatur in der Achse des Expansionsraumes, endlich die letzte Reihe die Mitteltemperatur des ganzen Querschnittes.

Zahlentafel 1.

Ermittelung des Temperaturverlaufes hinter der Drosselstelle.

	Thermoelement außen						Thermoelement Mitte	Mittelwert
L	1	2	3	4	5	6		
				Dampfgeschwindigkeit 7,2 m/sk				
1	120,5	120,3	122,2	124,0	121,2	123,5	123,8	121,9
3	120,7	121,1	122,5	122,9	121,5	123,5	122,7	122,1
6	121,4	121,0	121,4	121,8	122,4	122,3	122,0	121,8
10	120,3	120,4	121,4	122,3	121,6	120,5	120,6	121,0
15	119,0	118,7	120,4	119,9	119,2	118,2	117,2	118,9
				Dampfgeschwindigkeit 14,0 m/sk				
1	125,1	124,6	124,2	123,6	124,9	125,9	124,5	124,7
3	123,3	124,0	124,0	123,4	124,5	125,1	124,5	124,1
6	122,4	122,4	123,1	123,7	124,2	123,8	123,9	123,4
10	121,3	121,6	122,4	123,0	122,7	121,5	120,3	121,9
15	117,4	117,3	118,8	119,2	118,8	116,9	113,6	117,4

[1]) Die messenden Versuche am Kalorimeter wurden selbstverständlich erst begonnen, nachdem die Kupferschale ganz mit abtropfendem Kondensat gefüllt war. Die Angaben der Thermoelemente im Kalorimeter gaben darüber Aufschluß, wann dies eingetreten war.

[2]) Diese Prüfung wurde durch 3 Kontrollversuche bestätigt.

Aus der Zahlentafel ist zu ersehen, daß in 1 cm Abstand von der Drosselstelle noch keine Homogenität vorhanden ist. Die Maximalabweichung beträgt 3,5° C. In einem Abstand von 3 cm zeigt sich nur mehr ein Fehlerbetrag von 1,8° C, welcher auch bei allen weitern Querschnitten noch vorhanden ist. Da jedoch vom 2. Querschnitt (3 cm Abstand) an ein stetiges Abfallen der Temperatur, bedingt durch die Wärmeverluste nach außen, sich zeigt, so wurden alle folgenden Versuche so durchgeführt, daß nur mehr eine Messung in diesem Abstand von 3 cm erfolgte.

ad b) Die Resultate der 10 angestellten Beobachtungsreihen, die zur Feststellung der Genauigkeit nach der auf S. 42 angegebenen Methode dienten, sind in den Zahlentafeln 3 und 4 S. 36 und den Kurventafeln Fig. 16 bis 20 niedergelegt.

Es seien zunächst in Zahlentafel 2, S. 34, zwei vollständige Beobachtungsreihen mit annähernd der gleichen Dampfmenge (rd. 100 kg/st) und zwei verschiedenen Drücken (2 und 4 at) mitgeteilt. In denselben bedeutet:

p_1 = den abs. Kesseldruck in kg/qcm,
p_2 = den abs. Druck in der Expansionskammer in mm Hg,
m = das Gewicht des Kühlwassers in der Kondensationsvorrichtung in kg/st,
t' = die Eintrittstemperatur des Kühlwassers,
t'' = die Austrittstemperatur des Kühlwassers.

Die beiden unter einander stehenden Werte in der Spalte für p_1 gehören den beiden Zeigerablesungen des Kontrollmanometers an. Die Mittelwertskorrektion für das Kontrollmanometer wurde durch eine Eichung desselben erhalten. Die beiden Werte für p_2 entsprechen den Ablesungen der Menisken des Quecksilbermanometers. Die Differenz der beiden Ablesungen vermehrt um den Barometerstand ergibt den absoluten Druck der Niederdruckseite in mm Quecksilbersäule.

Die Versuche ergaben, wie schon früher erwähnt und wie auch die Zahlentafel 1, S. 32, erkennen läßt, eine Abweichung der Temperaturangaben der Thermoelemente von 1,8° C im Höchstfalle.

Es sei noch erwähnt, daß bei einer Veränderung der Dampffeuchtigkeit durch die Zusatzfeuchtigkeit die Einstellung der Thermoelemente auf die dadurch hervorgerufene Temperatur, d. h. der Eintritt des Beharrungszustandes im Expansionsraum nahezu gleichzeitig mit der Einschaltung der Kühlvorrichtung erfolgte, vorausgesetzt, daß die unter der Kondensationsröhre befindliche Schale, s. Fig. 21, mit Wasser gefüllt war. War dies nicht der Fall, so zeigten sich im Drosselkalorimeter große Differenzen der Angaben der Thermoelemente. Das Füllen der kleinen Schale brauchte jedoch bei jeder Versuchsreihe nur einmal vorgenommen zu werden (indem man bei Beginn des Versuches die Kondensationsvorrichtung einige Zeit in Tätigkeit setzte).

3 bis 5 Minuten nach Einregulierung der Kühlwassermenge war keine Veränderung der von den Thermoelementen erzeugten Galvanometerausschläge mehr zu konstatieren. Es wurde nun zunächst die einregulierte Kühlwassermenge gemessen, wozu etwa 25 min Zeit erforderlich waren, sodann die Ablesungen der Thermoelemente vorgenommen.

Auswertung eines Versuches.

Zur Veranschaulichung, wie aus den beobachteten Werten von p_1, p_2, m, t', t'' die Dampffeuchtigkeit zu berechnen ist, möge die Rechnung für einen Versuch und zwar für den zweiten der ersten Versuchsreihe ausführlich durchgeführt werden, da bei demselben auch die Kondensationsvorrichtung in Anwendung kam.

Zahlen-

Zeit	p_1 in kg/qcm		p_2 in mm Hg	Angaben der Thermoelemente außen							
	Ablesung	berichtigter Wert		1	2	3	4	5	6	Mittelwert	°C
11^{00}	2,03 2,05	2,01	270 320	111,0	112,0	111,8	112,2	112,0	111,0	111,7	108,7
11^{35}	2,02 2,03	2,00	260 330	109,0	109,1	109,0	109,9	108,2	108,1	107,4	104,6
12^{00}	2,00 2,01	1,97	265 325	107,5	107,7	106,6	107,0	106,0	105,7	106,4	104,1
12^{30}	1,98 2,00	1,96	265 325	104,9	105,1	104,8	104,1	103,8	104,0	104,4	101,8
9^{15}	4,12 4,09	4,11	285 305	127,0	127,0	127,0	127,6	127,9	127,6	127,2	123,0
10^{05}	4,12 4,09	4,125	285 305	121,6	120,6	121,7	122,1	122,2	122,3	121,8	118,0
10^{30}	4,04 4,01	4,025	290 300	116,1	116,0	117,5	117,7	117,2	116,8	116,9	113,6
11^{00}	4,09 4,04	4,065	290 300	118,0	118,3	119,0	119,8	119,8	119,2	119,0	115,4

Aus den Beobachtungsresultaten, Zahlentafel 2, entnehmen wir $p_1 = 2{,}00$ kg/qcm

$$p_2 = 717 + 330 - 260 = 787 \text{ mm Hg}, \quad t_{2m} = 104{,}15^0.$$

Zu berechnen ist t_{1s}, t_{2s}, r_1, i_1 und i_2. Die Werte von $t_{2s} = 101{,}0$ und $r = 526{,}8$ werden mit genügender Genauigkeit durch Interpolation den Tabellen von Mollier entnommen. Die Größen i_1 und i_2 berechnen sich aus der auf S. 11 angegebenen allgemeinen Formel Nr. 4:

$$i = (n+1)\,\psi + A v' P + \text{konst.}$$

Durch die Einführung der von Mollier angegebenen Konstanten geht diese Gleichung über in den Ausdruck

$$i = 594{,}735 + 0{,}477\,t - Jp,$$

worin t die Sättigungstemperatur, p der Druck in kg/qcm ist und J die folgende Bedeutung hat:

$$J = \frac{10\,000}{427}\left(\frac{13}{3}\,\mathfrak{V} - 0{,}001\right),$$

worin

$$\mathfrak{V} = 0{,}075\left(\frac{273}{T}\right)^{\frac{10}{3}}.$$

Die Werte von J sind in einer Zahlentafel (Tafel V) von Mollier (a. a. O.) zusammengestellt und können daraus mit ausreichender Genauigkeit erhalten werden.

Es ist dann:

$$i_1 = 594{,}735 + 0{,}477 \cdot 119{,}6 - 2{,}25 \cdot 2{,}0$$
$$\mathbf{i_1 = 647{,}184}$$
$$i_2 = 594{,}735 + 0{,}477 \cdot 101{,}0 - 2{,}64 \cdot 1{,}07$$
$$\mathbf{i_2 = 640{,}087.}$$

Die Feuchtigkeit des Dampfes ergibt sich dann nach S. 13 aus der Gl. (11):

$$y = \frac{i_1 - i_2 - cp_m\,(t_2' - t_{2s})}{r_1}\,100.$$

Im vorliegenden Versuch ist also

$$y = \frac{647{,}184 - 640{,}087 - 0{,}463 \cdot (104{,}15 - 101{,}0)}{526{,}8} = \mathbf{1{,}06}\ \text{vH.}$$

tafel 2.

Thermoelement in der Mitte		t_{2m}	Kondensat.-Vorricht.			Messung der Gesamt-Dampfmenge	Bemerkungen
Ablesung	°C	Gesamtmittel	m kg/st	t'	t''		
110,8	107,8	108,2	—	—	—		Barometerstand $b = 717{,}0$ mm
106,4	103,7	104,15	3,010	21,0	73,2	Kondensatgewicht (in 8 min) brutto $G_B = 15{,}78$ kg	
105,9	103,2	103,65	5,130	20,6	57,2	Gewicht des Auffanggefäßes $G_T = 2{,}480$ kg	
102,5	100,0	100,9	10,90	20,8	41,8	$G = 99{,}72$ kg/st	
127,1	122,9	122,95	—	—	—		Barometerstand $b = 720{,}2$ mm
122,0	118,1	118,05	4,380	17,0	77,5	$G_B = 19\ 92$ kg	
117,1	113,8	113,7	8,520	16,2	57,0	$G_T = 2{,}480$ kg beob. Zeit = 10 min	
119,4	115,8	115,6	14,98	15,0	40,0	$G = 104{,}64$ kg/st	

Die durch die Kondensationsvorrichtung zugeführte Feuchtigkeit berechnet sich zu

$$y = \frac{m(t'-t'')\cdot 100}{Gr} = \frac{3{,}010\cdot(73{,}2-21{,}0)\cdot 100}{99.72\cdot 527.0} = \mathbf{0{,}29}\ \text{vH}.$$

Die Zahlentafeln 3 und 4 S. 36 enthalten die durch die Prüfungsversuche erhaltenen Werte, sowie die daraus berechneten Größen. Durch direkte Ablesung und Messung sind ermittelt: der Kesseldruck p_1, der Druck im Expansionsraum p_2, die Temperatur im Expansionsraum t_{2m}, die stündlich durch das Kalorimeter geströmte Dampfmenge G, das Kühlwassergewicht m, die Einströmtemperatur des Kühlwassers t', die Ausflußtemperatur t''. Die Werte für die dem Niederdruck entsprechende Sättigungstemperatur t_{2s} sowie für die dem Kesseldruck entsprechende Verdampfungswärme r_1 wurden durch Interpolation aus den Mollierschen Dampftabellen entnommen, i_1 und i_2, die dem Hoch- bezw. Niederdruck entsprechenden Erzeugungswärmen, sind auf die S. 11 angeführte Art berechnet. Die durch die Kondensationsmethode niedergeschlagene Dampfmenge in vH ist in der Spalte Δy eingetragen. φ_{kal} ist jene Dampffeuchtigkeit, welche sich aus den beobachteten Angaben des Drosselkalorimeters berechnet; φ_{kond} diejenige Feuchtigkeit, welche sich durch die Anwendung der Kondensationsvorrichtung ergiebt, wobei die vor Inbetriebsetzung derselben vorhandene Feuchtigkeit, die nur durch das Drosselkalorimeter festgestellt wurde, als richtig bestimmt angenommen ist. Die Werte für φ_{kond} und φ_{kal} stimmen daher durch diese Voraussetzung für $\Delta y = 0$ überein.

Aus dieser Zahlentafel ergibt sich ziffernmäßig eine gute Uebereinstimmung zwischen den wirklichen Werten der Dampffeuchtigkeit und den durch das Drosselkalorimeter angegebenen Zahlen. Durch die graphische Auswertung der Versuche Fig. 16 bis 20 und die damit verbundene Extrapolation, wie sie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben ist, erfährt auch der als richtig angenommene Wert der ursprünglichen Feuchtigkeit eine Korrektur. Dadurch erscheinen die Abweichungen bei größeren Dampfgeschwindigkeiten etwas größer als dies in der Zahlentafel der Fall ist. Dabei liegen die vom Kalorimeter angegebenen Werte etwas höher als die Absolutwerte. Bei vollkommener Uebereinstimmung der An-

gaben mit den wirklichen Werten müßte die Eichkurve unter 45° zu den Ordinatenachsen geneigt sein, wie schon auf S. 30 gezeigt wurde. Diese Uebereinstimmung ergibt sich bei ganz geringen Dampfgeschwindigkeiten (siehe die 2. tiefer liegende Kurve von Fig. 20).

Wenngleich das oben beschriebene Drosselkalorimeter bis zu derjenigen Maximalfeuchtigkeit verwendbar ist, die aus Fig. 2 zu entnehmen ist, so wird man doch

Zahlentafel 3. Eichung des Kalorimeters.

Versuchsreihe	Nr.	p_1	p_2	t_2'	t_{2s}	i_1	i_2	G	m	t''	t'	r_1	Δy	φ_{kond}	φ_{kal}
I	1	2,01	767	108,2	100,3	647,2	639,8	99,72	—	—	—	526,7	—	0,70	0,70
	2	2,00	787	104,15	101,0	647,2	640,1	99,72	3,010	21,0	73,2	526,8	0,29	0,99	1 06
	3	1,97	777	103 65	100,7	647,1	640,0	99,72	5,130	20,6	57,2	527,0	0,36	1,06	1,08
	4	1,96	777	100,9	100,7	647,0	640,0	99,72	10,90	20,8	41,8	527,0	0,44	1,14	1,31
II	5	2,01	827	108,45	102,4	647,2	640,7	149,0	—	—	—	526,7	—	0,70	0,70
	6	2,04	817	107,0	102,1	647,4	640,6	149,0	2,67	21,6	76,6	526,5	0,19	0,89	0,82
	7	2,03	827	106,35	102,1	647,3	640,6	149,0	4,872	21,0	59,2	526,6	0,23	0,93	0,91
	8	2,02	827	105,2	102,1	647,2	640,6	149,0	10,92	22,5	42,3	526,7	0,28	0,98	0,98
III	9	4,11	740	122,95	99,2	655,7	639,4	104,64	—	—	—	510,5		1,06	1,06
	10	4,125	740	118,05	99,3	655,8	639,4	104,64	4,380	17,0	77,5	510,4	0,19	1,55	1,52
	11	4,025	730	113,7	98,9	655,5	639,3	104,64	8,520	16,2	57,0	511,0	0,66	1,72	1,85
	12	4,065	735	115,6	99,1	655,6	639,3	104,64	14,98	15,0	40,0	510,8	0,98	2,01	1,76
IV	13	4,02	790	125,65	101,1	655,5	640,2	193,2	—	—	—	511,0	—	0,77	0,77
	14	4,065	810	122,9	101,8	655,6	640,5	193,2	3,93	18,2	82,5	510,8	0,26	1,03	1,04
	15	4,09	800	122,9	101,5	655,7	640,4	193,2	6,180	19,2	65,6	510,6	0,29	1,06	1,06
	16	4,05	770	122,2	100,4	655,6	639,9	193,2	13,67	18,8	44,4	510,9	0,35	1,02	0,92

Zahlentafel 4.

Versuchsreihe	Nr.	p_1	p_2	t_2'	t_{2s}	i_1	i_2	G	m	t''	t'	r_1	Δy	φ_{kond}	φ_{kal}
V	17	5,98	807	127,6	101,7	660,2	640,4	59,6	—	—	—	500,6	—	1,06	1,06
	18	6,05	842	119,1	102,9	660,3	641,9	59,6	5,868	19,2	77,1	500,2	1,12	2,18	2,18
	19	6,09	842	117,9	102,9	660,4	641,9	59,6	14,70	19,3	46,4	499,8	1,27	2,33	2,31
VI	20	6,03	817	131,75	102,1	660,3	640,6	97,9	—	—	—	500,3	—	1,19	1,19
	21	5,99	807	125,45	101,7	660,2	640,4	97,9	5,736	20,8	76,2	500,5	0,65	1,84	1,76
	22	6,06	797	125,15	101,4	660,4	640,3	97,9	13,080	20,6	49,8	500,1	0,78	1,89	1,82
VII	23	5,98	857	134,05	103,4	660,2	641,1	223,5	—	—	—	500,6	—	0,98	0,98
	24	6,11	857	131,95	103,4	660,5	641,1	223,5	6,075	20,6	74,1	499,7	0,29	1,27	1,24
	25	6,02	817	130,95	102,1	660,2	640,6	223,5	13,260	22,6	49,5	500,3	0,32	1,30	1,24
VIII	26	8,04	799,2	132,05	101,5	663,6	640,3	54,92	—	—	—	491,8	—	1,86	1,86
	27	8,03	849,2	121,15	103,1	663,5	641,0	54,92	6,132	19,0	76,1	491,7	1,29	3,15	2,80
	28	7,98	829,2	119,85	102,5	663,4	640,8	54,92	10,200	19,1	58,1	492,0	1,44	3,30	2,98
	29	7,98	829,2	118,85	102,5	663,4	640,8	54,92	21.24	18,0	38,7	492,0	1,63	3,49	3,05
IX	30	8,00	839,2	138,1	102,8	663,5	640,9	135,36	—	—	—	491,7	—	1,26	1,26
	31	8,02	919	133,85	105,3	663,5	641,9	135,36	6,510	18,8	75,2	491,8	0,47	1,73	1,70
	32	8,02	919	133,85	105,3	663,5	641,9	135,36	9,88	19,7	58,2	491,8	0,52	1,78	1,70
	33	8,03	919	133,5	105,3	663,5	641,9	135,36	22.14	17,4	37,2	491,7	0,65	1,91	1,75
X	34	8,00	869	140,8	103,8	663,5	641,3	234,3	—	—	—	491,8	—	1,04	1.04
	35	7,98	889	137,9	104,4	663,4	641,5	234,3	6,255	19,4	77,4	492,0	0,31	1,35	1,30
	36	7.99	884	138,0	104,2	663,5	641,2	234,3	14,36	17,8	46,4	491,9	0,36	1,40	1,36
	37	7,98	884	136.7	104,2	663,4	641,2	234,3	39,44	14,3	27,2	492,0	0,44	1,48	1,47

nicht dasselbe allein, sondern in Verbindung mit einem Wasserabscheider benutzen. Wie bereits oben S. 18 erwähnt, und wie durch die im Nachstehenden beschriebenen Versuche mit den Wasserabscheidern bestätigt gefunden wurde, fließt nämlich der Hauptteil der im Dampf enthaltenen Feuchtigkeit an der Rohrsohle, während nur ein geringer Bruchteil in Form kleinster Tröpfchen im Dampf suspendiert ist. Man wird daher bei einer praktischen Bestimmung der Dampffeuchtigkeit stets so zu verfahren haben, daß man die an der Rohrsohle fließende Wassermenge mittels des Wasserabscheiders feststellt und mit dem Kalorimeter nur die Ergänzungsbestimmung vornimmt.

D) Prüfung von Wasserabscheidern mit Hülfe des neu konstruierten Drosselkalorimeters.

Einleitung.

Die Wasserabscheider spielen in der Dampftechnik eine bedeutende Rolle, kommt ihnen doch in erster Linie die Aufgabe zu, die äußerst gefährlichen Wasserschläge zu vermeiden und außerdem den Dampf von dem teils aus dem Kessel stammenden, teils durch Kondensation an den Rohrwandungen entstandenen mitgerissenen, tropfbar flüssigen Wasser zu befreien, so daß an die Verbrauchsstelle möglichst trockner Dampf gelangt.

Durch die Unvollkommenheit der Methoden zur Bestimmung der Dampffeuchtigkeit war es aber bis jetzt noch nicht gelungen, ein Urteil über Wirkungsweise und Wirkungsgrad der zahlreichen Konstruktionen von Wasserabscheidern zu erhalten. Nachdem nun durch das neue Drosselkalorimeter die Möglichkeit einer genauen Feuchtigkeitsbestimmung gegeben war, wurde eine systematische Untersuchung von Wasserabscheidern vorgenommen. Die Untersuchung erstreckte sich auf die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von Feuchtigkeitsgrad, Druck und Dampfgeschwindigkeit, sowie auf die durch die Abscheider hervorgerufenen Wärmeverluste.

Die einzige ältere Untersuchung, welche meines Wissens in dieser Richtung angestellt wurde, ist von F. L. Emvry [1]) durchgeführt, derselbe hat jedoch nur einen einzigen Abscheider in den Bereich der Messung gezogen. Da die Bestimmung der Dampffeuchtigkeit mittels kleiner Carpenter-Drosselkalorimeter sowie durch eine kalorimetrische Kondensationsmethode geschah, deren Zuverlässigkeit durch die Länge der Leitungen, welche die Dampfprobe passieren mußte, in Frage steht, so dürfte das Resultat, das mit dieser Anordnung erreicht wurde, auch infolgedessen den Tatsachen nicht ganz ensprechen.

Emvry findet, daß der aus dem Abscheider kommende Dampf über einer gewissen Geschwindigkeit unabhängig vom Dampfdruck immer denselben Feuchtigkeitsgrad von 3 vH aufweist.

In der vorliegenden Arbeit wurden 6 Wasserabscheider untersucht, welche drei verschiedenen Gruppen von Abscheidern angehören.

Abscheider A, D und E sind sogenannte Stoßwasserabscheider, bei welchen der Dampf gegen ein Gitterwerk, Abscheider A, Fig. 23, oder eine Fläche, Abscheider D und E, Fig. 26 und 27, prallt und dort das mitgerissene Wasser abgibt.

Um die Geschwindigkeit des Dampfes zu vermindern und dadurch eine weitere Trocknung des Dampfes zu erzielen sind diese Abscheider mit ziemlich großen Volumen, etwa mit dem 4-fachen Durchmesser der Dampfleitung ausgeführt.

Die zweite Art von Abscheidern beruht darauf, daß der Dampf bei plötzlicher Richtungsänderung das Wasser, das dieser Bewegungsrichtung nicht mehr zu folgen vermag, an die Wandungen schleudert.

[1]) F. L. Emvry, »Test of a Steam-Separator«. Transaktions of A. S. M. E. 1899 p. 485.

Schließlich wurde noch eine einfache, mit exzentrischer Bohrung versehene, zwischen 2 Flanschen geklemmte Kupferscheibe; Fig. 7, welche nur das an der Sohle fließende Wasser abnehmen konnte, auf ihren Wirkungsgrad geprüft.

Die Abscheider A, B, sowie die Kupferscheibe sind für 50 mm, Abscheider C, D, E, für 80 mm Dampfleitungsdurchmesser gebaut.

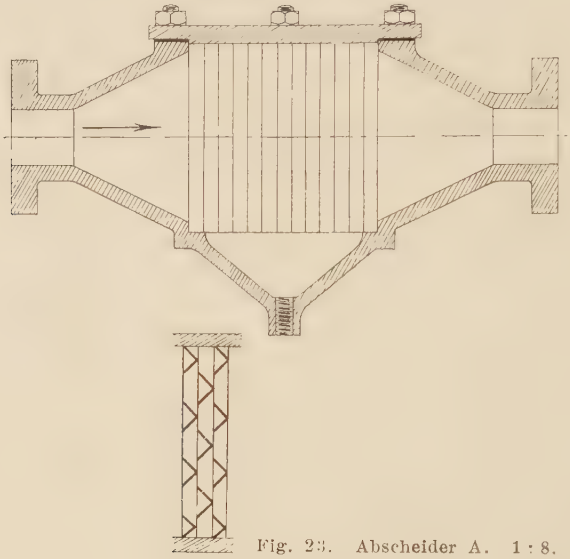

Fig. 23. Abscheider A. 1 : 8.

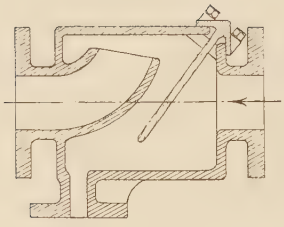

Fig. 24. Abscheider B. 1 : 8.

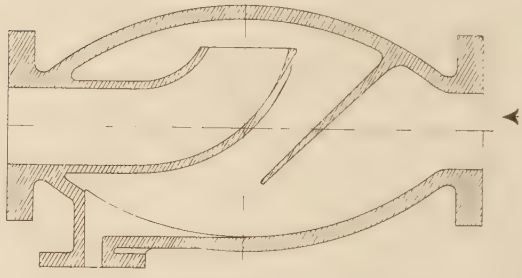

Fig. 25. Abscheider C. 1 : 8.

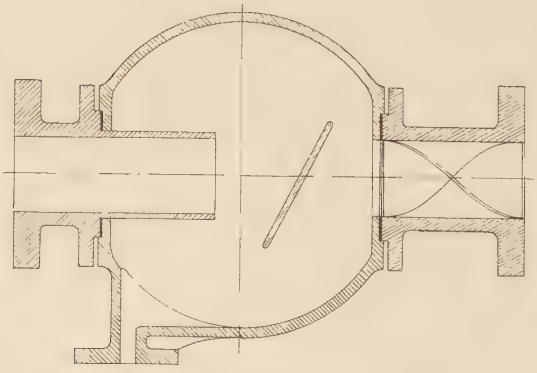

Fig. 26. Abscheider D. 1 : 8.

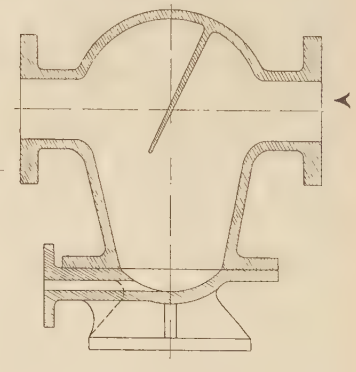

Fig. 27. Abscheider E. 1 : 5.

Versuchsanordnung.

Die Dampfzuleitung blieb dieselbe, wie bei der Eichung des Drosselkalorimeters. Danach hatte der Dampf, bis er zum Wasserabscheider gelangte, zuerst 12 m horizontale, dann 5 m vertikale und schließlich wieder 3 m horizontale Leitung zu durchlaufen. Zur Feststellung der, von dem zu untersuchenden Abscheider dem Dampf entnommenen Wassermenge war nachstehend beschriebene, in Fig. 28 dargestellte Vorrichtung angebracht. An die Wasserausstoßöffnung des Abscheiders

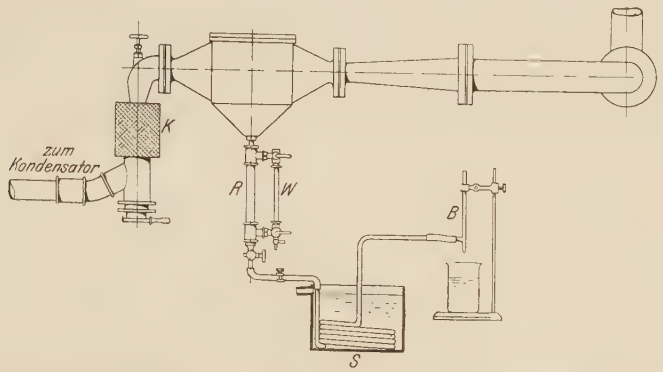

Fig. 28. Prüfung von Wasserabscheidern (Versuchsanordnung). 1 : 25.

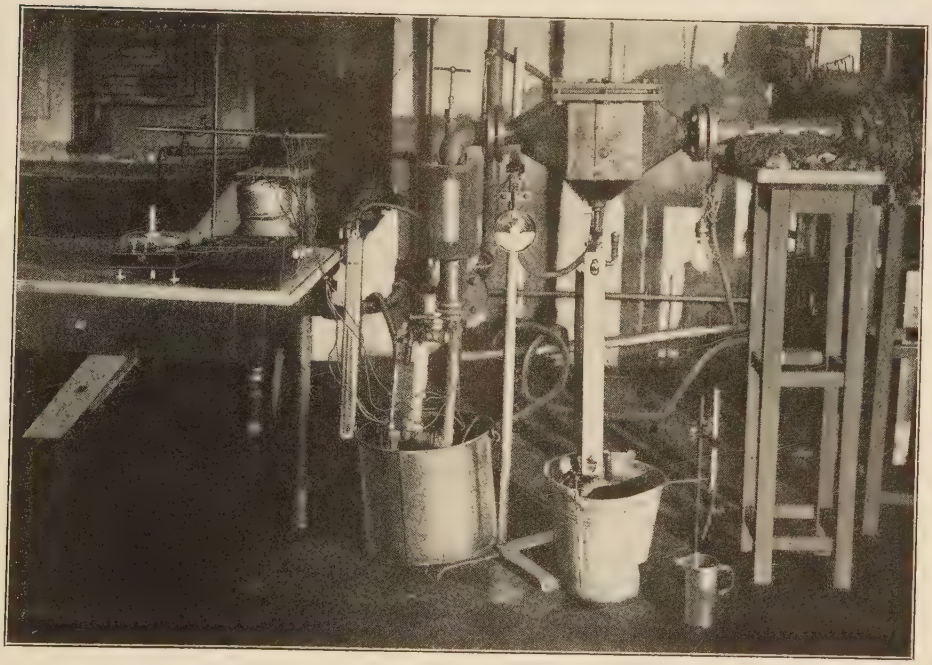

Fig. 29.

schloß sich unmittelbar ein vertikalstehendes Rohr *R* von 1″ Drm. an, an welchem ein gewöhnlicher Wasserstand *W*, wie er an Dampfkesseln gebräuchlich ist, die Höhe des Wasserspiegels in dem Rohr erkennen ließ. Das abgeschiedene Wasser gelangte von dieser Vorrichtung aus durch eine gekühlte Kupferspirale *S*, welche das Verdampfen des austretenden Wassers verhinderte, in eine Bürette *B*, wie S. 32 beschrieben, und von hier aus in das Meßgefäß.

Direkt hinter der Austrittsöffnung des Abscheiders war das Kalorimeter K in vertikaler Richtung angeordnet, wie aus Fig. 28 und der photographischen Abbildung Fig. 29 zu ersehen ist. Der aus dem Kalorimeter austretende Dampf wurde zur Bestimmung seiner Menge in einen großen Kondensator geleitet. Am tiefsten Punkt der Rohrleitung zwischen Kalorimeter und Kondensator wurde noch das in dieser Leitung kondensierte Wasser abgenommen, zu welchem Zweck eine gleiche Vorrichtung mit Wasserstand, wie das Rohr R am Abscheider, diente.

Die Leitung vom Kessel bis zum Kalorimeter, also auch der Abscheider, war sorgfältig isoliert, so daß die Anlage vollkommen den in der Praxis verwendeten Dampfleitungen entsprach. Die Isolation wurde nur zum Zweck der Untersuchung des Einflusses von Kondenswasser, das sich an den Rohrwandungen bildet, sowie zur Bestimmung der Wärmeverluste der Abscheider zeitweilig abgenommen.

Durchführung der Untersuchung.

Im ersten Teil, α, wurde der Wirkungsgrad eines Wasserabscheiders bei konstanter Dampfgeschwindigkeit für zwei verschiedene Drucke bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten des Dampfes bestimmt. Die Dampfnässe vor dem Abscheider wurde nicht durch ein eigenes Instrument ermittelt, sie ergab sich auf einfache Weise durch Addition der abgeschiedenen Wassermenge und der, nach Verlassen des Abscheiders noch im Dampf befindlichen, die durch das Kalorimeter festgestellt wurde, unter Abzug der im Abscheider durch Kondensation hinzugekommenen Feuchtigkeit. Diese Verluste wurden durch die im Teil γ angegebene Methode festgestellt.

Die Veränderung des ursprünglichen Wassergehaltes wurde, um den Verhältnissen der Praxis möglichst nahe zu kommen, durch Veränderung des Wasserstandes im Kessel und durch teilweises Abisolieren der Dampfleitung erreicht. Eine weitere Veränderung der Dampfnässe wurde unter Umständen durch die bei der Prüfung des Kalorimeters angewandte Kondensationsvorrichtung, s. S. 31 und Fig. 16, erzielt, während umgekehrt bei Versuchen mit möglichst geringer Feuchtigkeit 2 Wasserabscheider in die Dampfleitung vor dem zu untersuchenden eingesetzt wurden.

Im zweiten Teil β der Versuche wurde für die einzelnen Abscheider der Einfluß des Druckes und der Dampfgeschwindigkeit auf den Feuchtigkeitsgehalt hinter dem Wasserabscheider bestimmt. Die verschiedenen Geschwindigkeiten ließen sich durch das Regulierventil des Drosselkalorimeters bequem einstellen und konnten durch Messung des stündlichen Kondensats ermittelt werden.

Den Teil γ der Untersuchung bildet die Messung der Wärmeverluste, welche durch die Abscheider, die fast alle eine ziemlich beträchtliche Oberfläche aufweisen, bedingt sind.

Diese Verluste wurden sowohl für die isolierten als auch für die unisolierten Apparate durchgeführt. Verwendet wurde doppelte Seidenzopfisolation, welche sich wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit und der Möglichkeit rascher Anbringung und Entfernung für diese Versuche besonders eignete.

Die Feststellung der Wärmeverluste ohne Isolation möchte vielleicht als überflüssig angesehen werden, da derartige Apparate in der Praxis wohl nie ohne Isolation angewendet werden. Die Möglichkeit, jedem Abscheider eine Isolierung von gleicher Isolierwirkung (bezogen auf die Flächeneinheit) zu geben, ist jedoch sehr gering. Ein genaues Bild der Verluste gibt daher nur eine Messung der blanken Abscheider.

Zur Feststellung der Wärmeverluste wurde folgendermaßen verfahren:

Durch den Abscheider wurde bis zum Eintritt des Beharrungszustandes, der sich durch Konstantbleiben des Wasserspiegels in dem Wasserstand W, Fig. 28,

unter dem Abscheider bei konstanter Ausflußmenge äußerte, eine größere Dampfmenge geschickt (etwa 100 bis 150 kg/st). Dadurch erreichte man, daß alle im Abscheider enthaltene Luft aus demselben entfernt wurde. Hierauf wurde durch Drosselung im Kalorimeter die Dampfmenge soweit herabgesetzt, daß sie im Mittel etwa 6 kg/st betrug und gerade genügte, um die im Wasserabscheider sich ansammelnde Luft mit fortzuleiten.

Bei diesen Versuchen wurde durch einen unmittelbar vor den Abscheider gesetzten, sowie zwei weitere in die Dampfleitung eingebauten Abscheider der Dampf soweit getrocknet, daß er in dem letzten Abscheider nur wenige Tausendstel des Wassergehaltes verlieren konnte.

Die aus dem Wasserabscheider bei diesem Versuch stündlich abfließende Wassermenge, die wieder auf die oben, s. S. 39, beschriebene Weise gemessen wurde, kann daher nur durch Kondensation an den Wandungen des Abscheiders entstanden sein und gestattet daher, den Wärmeverlust desselben zu berechnen.

Versuchsresultate.

α) Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Wasserabscheider von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider.

Durch einleitende Versuche sollte bei konstanter Dampfmenge die Abhängigkeit des Wirkungsgrades eines Abscheiders von der ursprünglichen Dampffeuchtigkeit, d. h. jenem Wassergehalt, der sich vor Passieren des Abscheiders im Dampf befindet, festgestellt werden. Zu diesem Zwecke wurde die Feuchtigkeit bei konstanter Dampfgeschwindigkeit durch Abisolieren der Rohrleitung und Anwendung der Kondensationsvorrichtung verändert.

Zahlentafel 5. Wasserabscheider A.

Art der Isolation der Dampfleitung	p_1 kg/qcm	p_2 mm Hg	Angaben des Millivoltmeters 1	2	3	4	5	6	Mitte	abgeschiedene Wassermenge	Dampffeuchtigkeit in vH vor	hinter dem Abscheider
Versuch I. $G = 84$ kg/st.												
doppelt, Seidenzopf	4,065	750	130,7	130,4	130,7	130,5	130,6	130,9	128,8	0,94	1,82	0,72
ohne Isolation	4,02	760	130,4	130,2	130,5	130,1	130,6	130,8	128,6	2,65	3,86	0,69
ohne Isol., mit Kondens.-Vorr	4,00	770	130,7	130,1	130,2	130,1	130,2	130,6	128,4	3,56	4,95	0,71
Versuch II. $G = 167$ kg/st.												
doppelt, Seidenzopf	7,99	844	148,9	148,6	148,2	148,8	148,3	148,6	146,0	1,65	1,74	0,75
ohne Isolation	8,06	844	149,2	149,0	148,3	149,0	148,8	148,9	146,7	3,19	2,62	0,71
ohne Isol., mit Kondens.-Vorr.	7,95	824	148,8	148,5	147,8	148,2	148,2	148,3	146,7	4,24	3,29	0,77

Die Versuche wurden mit dem Wasserabscheider A bei den Drucken 4 und 8 kg/qcm angestellt. Die Beobachtungsergebnisse sind in der Zahlentafel 5 eingetragen. Man erkennt, daß in den einzelnen Versuchsreihen die mittlere Temperatur auf der Niederdruckseite nahezu unverändert bleibt, auch wenn die Dampfnässe ungefähr im Verhältnis 1:3 verändert wird.

Somit ergibt sich die merkwürdige Erscheinung, daß sich trotz der bedeutenden erhöhten Dampfnässe nicht die geringste Aenderung der Dampffeuchtigkeit

hinter dem Wasserabscheider zeigt[1]). Auch die Veränderung des Wasserstandes im Kessel blieb vollständig ohne Wirkung auf die Temperatur in der Expansionskammer. Unabhängig von dem Werte der Dampffeuchtigkeit geht also durch einen Wasserabscheider bei einer bestimmten Dampfgeschwindigkeit stets die gleiche Dampfnässe hindurch.

Um die Richtigkeit des unter α) gewonnenen Resultates, daß die Dampffeuchtigkeit hinter dem Abscheider bei gegebenen Werten von Druck und Geschwindigkeit von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider unabhängig ist, für verschiedene Dampfgeschwindigkeiten zu prüfen, wurde eine Kurve des Wasserabscheiders *D* doppelt für den Druck 8 at aufgenommen, und zwar die erste, indem vor Abscheider *D* zwei weitere Abscheider in die Leitung eingesetzt wurden (s. Zahlentafel 9a und Kurve Fig. 33), die zweite unter Ausschaltung dieser Apparate.

Zahlentafel 9a.

p_1	p_2	t_2'	t_2	G	w	G'	y'	y
8,02	781,2	100,9	136,5	38,4	0,54	5,12	17,88	1,40
8,025	781,2	100,9	139,2	66,3	0,90	5,03	8,89	1,26
7,99	801,2	101.5	142,1	121,8	1,69	4,71	4,74	0,875
7,92	821,2	102,2	142,9	177,0	2,40	4,98	3.55	0,79
8,01	761,2	100,1	143,3	234,4	3,20	5,05	2,90	0,75
Nach Einschaltung von 2 Wasserabscheidern in die Dampfleitung.								
8,015	701,0	97,8	123,9	10,4	0,14	0,552	7.98	2,58
8,00	831,0	102,5	126,5	12,8	0.18	0,909	9,95	2,34
8,00	801,0	101,5	140,9	88,9	1,24	0,784	1,86	0,98
8,00	726 0	98,7	142,6	154,2	2,14	0,760	1,28	0,79
7.99	781,0	100,8	143,6	227,2	3,15	0,720	1,05	0.73

G' = im Wasserabscheider abgeschiedene Wassermenge,
y' = Feuchtigkeit vor dem Abscheider,
y = Feuchtigkeit hinter dem Abscheider.

Es ergab sich dabei eine vollständige Bestätigung der ersten Versuchsreihe für alle Dampfgeschwindigkeiten. In der Kurventafel Fig. 33 sind die beiden obersten Kurven durch diese 2 Versuchsreihen gewonnen worden. Die punktierte Kurve mit den durch δ gezeichneten Punkten entspricht hierbei der zweiten Versuchsreihe mit dem größeren Feuchtigkeitsgehalt vor dem Wasserabscheider. Obwohl die Dampffeuchtigkeit vor dem Abscheider z. B. bei einer Dampfgeschwindigkeit von 2,3 m/sk etwa auf den dreifachen Betrag gesteigert wurde, zeigte sich doch nur eine Erhöhung des Wassergehaltes hinter dem Abscheider von 0,02 vH.

β) Abhängigkeit der Abscheidewirkung von Druck und Dampfgeschwindigkeit.

Aufgrund dieser Beobachtung konnte daher dazu übergegangen werden, für jeden Wasserabscheider unabhängig von dem ursprünglichen Werte der Dampffeuchtigkeit vollkommene Eichkurven aufzustellen.

Der Wirkungsgrad der Wasserabscheider wurde bei verschiedenen Drucken p_1 für verschiedene Dampfgeschwindigkeit w bestimmt. Das Ergebnis dieser Messungen ist in den Zahlentafeln 6 bis 11 eingetragen und in den Kurventafeln Fig. 30 bis 35 graphisch dargestellt.

[1]) Hätte die Eichung des Kalorimeters nicht bewiesen, daß dasselbe bereits auf wenige Tausendstel reagiert, so hätte man eine Unempfindlichkeit des Instrumentes annehmen können. Dieses Resultat wurde noch bestätigt durch die bei 2 verschiedenen Dampffeuchtigkeiten aufgenommenen Eichkurven, s. S. 80 und Kurventafel Fig. 33.

In der letzten Reihe der Zahlentafeln ist die aus den Angaben des Drosselkalorimeters berechnete Dampffeuchtigkeit (in Prozenten) angegeben, welche der Dampf nach dem Durchströmen der betreffenden Wasserabscheider noch besaß.

Es sei ausdrücklich hervorgehoben, daß für den Wirkungsgrad eines Wasserabscheiders der Zahlenwert von y maßgebend ist und nicht etwa die Differenz oder

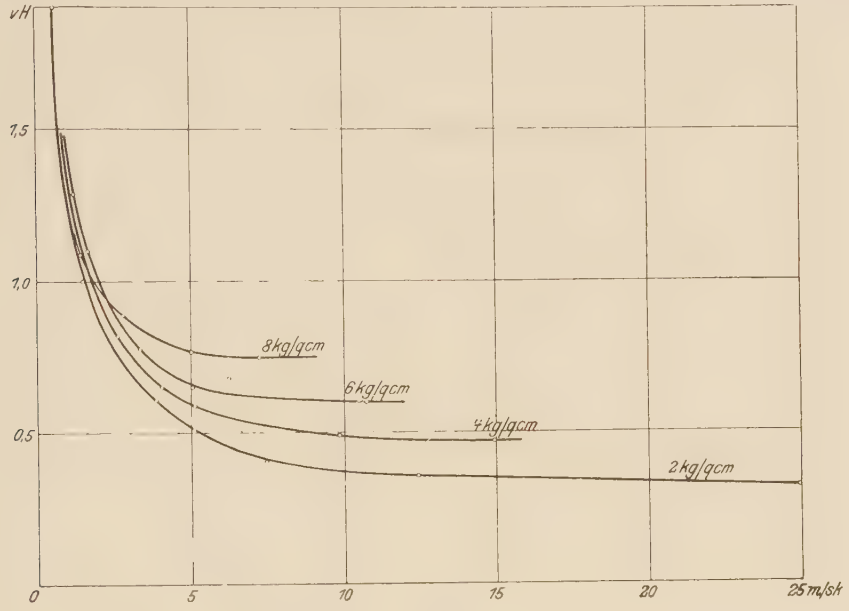

Fig. 30. Wasserabscheider A.

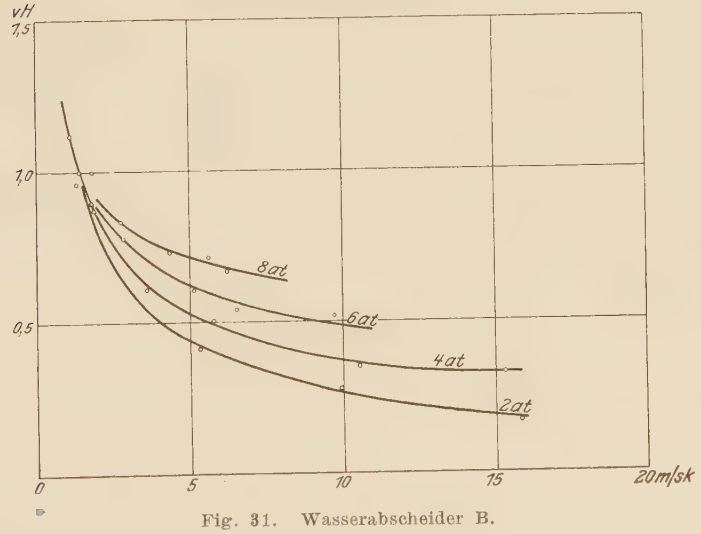

Fig. 31. Wasserabscheider B.

das Verhältnis der Feuchtigkeitsgrade vor und nach dem Abscheider. Denn die im Abschnitt (α) mitgeteilten Versuche beweisen ja, daß jeder Abscheider eine bestimmte, von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider unabhängige Feuchtigkeit hindurch läßt, die wie die Zahlentafel 6 bis 11 beweisen, nur von Druck und Dampfgeschwindigkeit abhängt. Um unrichtige Beurteilungen über den Wirkungsgrad zu

verhindern, ist daher die Dampffeuchtigkeit vor dem Abscheider in die Zahlentafel gar nicht aufgenommen und es sei nur beiläufig erwähnt, daß sie zwischen 2 und 5 vH_1 gelegen war.

In den Kurventafeln ist die Feuchtigkeit als Funktion der Geschwindigkeit aufgetragen; durch die zu gleichem Druck gehörigen Punkte ist je eine ausgleichende Kurve gelegt.

Die Versuchseinrichtung gestattete nur die Anwendung von Dampfmengen bis zu etwa 230 kg/st, so daß die Wasserabscheider für 50 mm lichte Rohrweite zwar

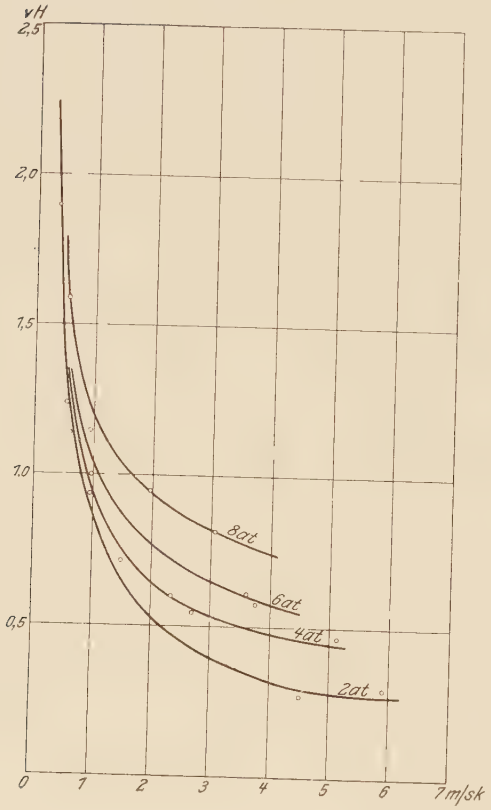

Fig. 32. Wasserabscheider C.

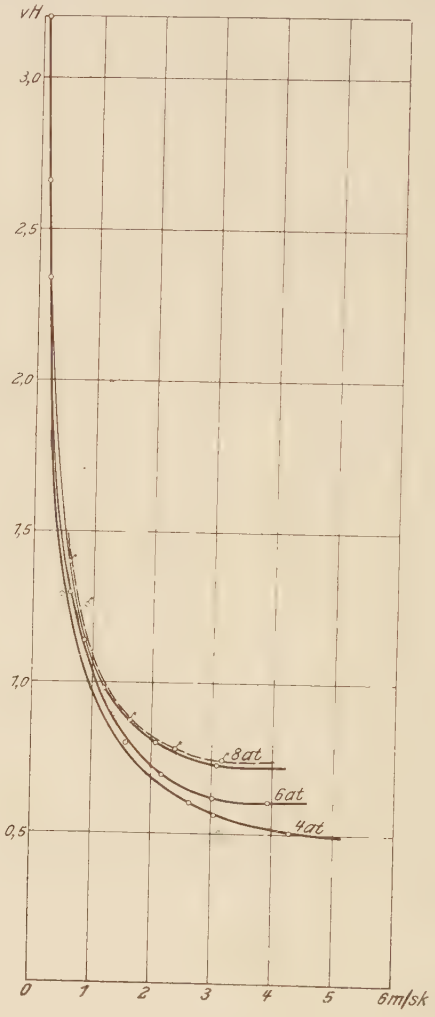

Fig. 33. Wasserabscheider D.

bis zur normalen Dampfgeschwindigkeit von $w = 25$ m/sk diejenigen für 80 mm jedoch nur bis maximal 6 m/sk untersucht werden konnten. Doch kann man aus dem Verlauf dieser Kurventeile bereits auf Fortsetzung schließen, besonders, wenn man die vollkommen identisch verlaufenden Kurven der kleineren Abscheider der Extrapolation zugrunde legt.

Sämtliche Kurven zeigen übereinstimmend, daß die durch den Abscheider hindurchgelassene Feuchtigkeit, die für geringe Dampfgeschwindigkeiten bis etwa 1 m/sek

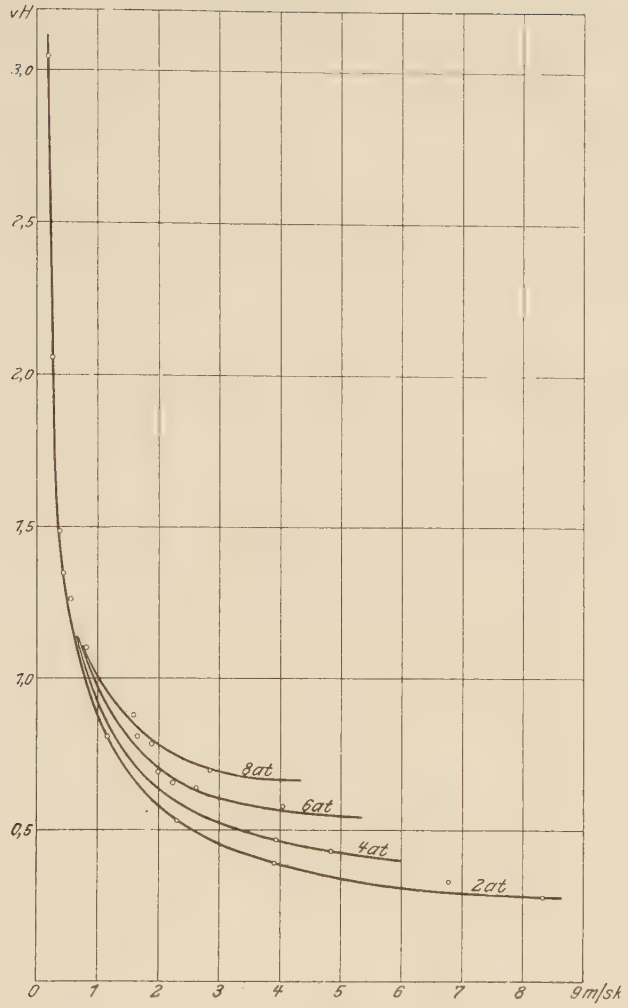

Fig. 34. Wasserabscheider E.

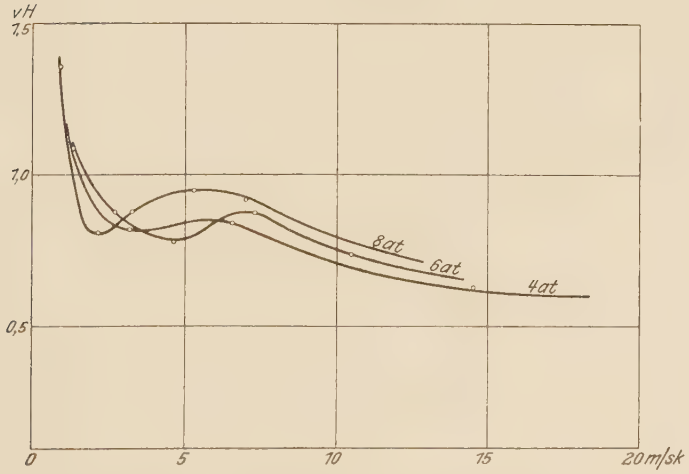

Fig. 35. Kupferscheibe als Wasserabscheider.

sehr hohe Beträge (bis etwa 3 vH) aufweist, mit zunehmender Geschwindigkeit sehr rasch sinkt, und dann von 5 m/sk bis zur normalen Dampfgeschwindigkeit nur mehr sehr geringe Abnahme erkennen läßt.

Dabei ergibt sich auch der charakteristische Unterschied zwischen den beiden Gattungen von Abscheidern. Die auf der Richtungsänderung des Dampfes basierenden Systeme (Abscheidung der *B* und *C*) ergeben zwar bei geringeren Geschwindigkeiten einen weniger steilen Verlauf der Feuchtigkeitskurve. Dieselbe zeigt jedoch mit wachsender Geschwindigkeit immer noch fallende Tendenz, selbst über die Normalgeschwindigkeit hinaus, was besonders bei Abscheider *B* augenfällig in Erscheinung tritt. Bei den Stoßwasserabscheidern *A*, *D* und *E* bleibt der Prozentsatz

Zahlentafel 6. Wasserabscheider A[1]).

p_1	p_2	t_{2s}	t_2'	i_1	i_2	G	w	r_1	y
kg qcm	mm Hg	°C	°C	WE	WE	kg/st	m/sk	WE	vH
2,00	725	98,7	104,6	647,2	639,2	11,3	1,38	526,8	1,00
2,00	820	102,2	109,4	647,2	640,7	31,9	3,88	526,8	0,61
2,00	790	101,1	111,6	647,2	640,2	60,6	7,38	526,8	0,40
2,00	715	98,3	111,8	647,2	639,0	101,9	12,4	526,8	0,36
2,00	725	98,7	112,3	647,2	639,2	201,6	24,9	526,8	0,32
4,01	840	102,8	120,1	655,5	640,9	17,5	1,16	511,1	1,29
4,00	725	98,7	124,5	655,4	639,2	39,1	2,58	511,2	0,82
4,00	805	101,7	127,6	655,4	640,4	76,1	5,04	511,2	0,59
3,995	765	100,2	128,5	655,4	639,8	148,8	9,78	511,2	0,49
4,00	780	100,8	128,7	655,4	640,0	225,0	14,9	511,2	0,47
6,00	731	98,9	123,0	660,2	639,3	11,7	0,53	500,4	1,94
6,00	731	98,9	132,1	660,2	639,3	35,9	1,63	500,4	1,10
6,00	731	98 9	135,6	660,2	639,3	72,6	3,29	500,4	0,78
6,00	701	97,8	136,7	660,2	638,8	141,1	6,39	500,4	0,68
6,005	761	100,1	137,7	660,2	639,7	229,0	10,7	500,4	0,60
8,00	861	103,5	134,5	663,5	641,2	18,3	0,62	491,8	1,59
8,01	786	101,0	139,9	663,5	640,5	36,8	1,24	491,7	1,08
8,00	746	99,5	141,7	663,5	639,5	79,4	2,72	491,8	0,89
8,00	746,5	99,6	103,1	663,5	639,5	145,5	5,0	491,8	0,75

Zahlentafel 7. Wasserabscheider B.

2,01	752	99,7	103,7	647,3	639,55	14,8	1,80	526,6	1,11
2,005	732	99,0	111,2	647,2	639,3	48,7	5,30	526,7	0,417
2,005	817	102,1	113,1	647,2	640,6	81,8	9,95	526,7	0,285
1,995	867	103,7	114,4	647,2	641,3	130,8	15,9	526,9	0,171
4,00	831	102,5	123,4	655,4	640,8	19,1	1,27	511,2	0,96
4,00	751	99,7	127,1	655,4	639,6	53,3	3,53	511,2	0,61
4,00	726	98,7	128,1	655,4	439,2	86,2	5,71	511,2	0,51
4,00	771	100,4	129,6	655,4	640,1	159,2	10,5	511,2	0,35
4,00	866	103,7	130,6	655,4	641,3	280,9	15,3	511,2	0,33
6,00	739	99,2	132,8	660,2	639,4	30,9	1,40	500,4	1,04
5,995	726	98,7	134,2	660,2	639,2	42,7	1,94	500,4	0,90
6,00	761	100,1	136,8	660,2	639,8	61,8	2,80	500,4	0,78
6,00	731	98,9	137,6	660,2	639,3	111,6	5,06	500,4	0,60
6,00	766	100,3	138,4	660,2	639,8	144,6	6,55	500,4	0,54
5,995	821	102,2	138,6	660,2	640,7	212,3	9,65	500,4	0,52
8,00	730	98,9	139,3	663,5	639,3	31,6	1,09	491,8	1,12
8,00	775	100,6	142,2	663,5	640,0	54,2	1,87	491,8	0,875
8,005	775	100,6	142,6	663,5	640,0	79,1	2,73	491,8	0,835
7,975	755	99,8	143,5	663,5	639,7	118,8	4,09	492,0	0,73
8,01	795	101,3	143,9	663,5	640,3	160,0	5,52	491,7	0,71
8,00	775	100,6	144,4	663,5	640,0	235,8	8,13	491,8	0,65

[1]) Die Versuchsreihen sind bei gleichem Druck nach wachsender Dampfgeschwindigkeit geordnet.

der Feuchtigkeit, nachdem er mit zunehmender Dampfgeschwindigkeit zuerst rasch abgefallen war, von etwa 5 m/sek an für alle Dampfgeschwindigkeiten nahezu konstant.

Zahlentafel 8. Wasserabscheider C.

p_1	p_2	t_{2s}	t_2'	i_1	i_2	G	w	r_1	y
kg/qcm	mm Hg	°C	°C	WE	WE	kg/st	m/sk	WE	vH
2,00	787,0	101,0	102,4	647,2	640,3	11,0	0,53	526,8	1,24
1,965	757,5	99,9	107,5	647,0	639,7	31,88	1,52	527,5	0,722
1,955	710,0	98,4	109,4	647,2	639,0	57,2	2,72	526,9	0,57
1,94	797,0	101,4	111,0	646,9	640,9	94,5	4,50	527,6	0,27
2,00	827,0	102,4	112,9	647,2	640,7	124,9	5,95	526,8	0,30
3,985	855,0	103,3	113,3	641,1	655,4	14,44	0,37	511,3	1,90
4,085	764,5	100,2	124,5	655,7	639,8	23,2	0,60	510,7	0,90
3,975	749,5	99,6	122,3	639,6	655,4	37,5	0,97	511,4	0,935
3,965	695,0	97,5	120,9	638,6	655,3	37,7	0,97	511,4	1,15
4,005	745,0	99,5	124,5	639,5	655,4	60,6	1,56	511,2	0,84
4,01	874,5	104,0	127,9	655,4	641,3	79,0	2,06	511,1	0,60
3,99	809,5	101,8	127,2	640,5	655,4	92,0	2,37	511,4	0,606
4,025	874,5	104,0	127,9	655,5	641,3	123,4	3,18	511,0	0,59
3,99	829,5	102,5	128,2	640,7	655,4	134,2	3,46	511,4	0,53
3,015	829,5	102,5	128,8	640,7	655,4	198,6	5,11	511,4	0,47
4,00	949,5	106,3	129,1	655,4	642,4	237,0	6,11	511,2	0,47
6,00	763,2	100,2	131,9	660,2	639,8	32,4	0,57	500,4	1,14
6,02	903,2	104,8	133,8	660,2	641,7	51,10	0,90	500,3	1,00
6,03	823,2	102,3	134,8	660,3	640,7	67,2	1,18	500,2	0,90
6,01	763,2	100,2	136,1	660,2	639,8	97,68	1,72	500,3	0,84
6,18	853,2	103,3	136,8	660,6	641,1	124,4	2,19	499,4	0,80
6,15	723,2	98,6	136,6	660,5	639,1	155,0	2,73	499,6	0,94
6,005	798,2	101,4	137,5	660,2	640,3	205,8	3,62	500,4	0,62
6,005	763,2	100,2	137,9	660,2	639,8	213,3	3,76	500,4	0,58
8,10	717,3	98,4	134,4	663,6	639,1	41,2	0,56	491,5	1,59
8,015	897,3	104,6	141,8	663,5	641,7	144,6	1,94	491,8	0,915
8,02	847,3	103,1	142,9	663,5	641,0	228,0	3,07	491,8	0,82

Zahlentafel 9. Wasserabscheider D.

4,10	722	98,6	120,1	655,7	639,1	16,7	0,43	510,4	1,29
4,10	722	98,6	125,3	655,7	639,1	43,0	1,11	510,4	0,82
4,09	797	101,4	123,9	655,7	640,3	48,4	1,25	510,6	0,96
4,12	722	98,6	124,5	655,8	639,1	55,8	1,44	510,4	0,92
4,12	797	101,4	127,8	655,8	640,3	93,7	2,42	510,4	0,625
4,00	807	101,7	127,3	655,4	640,4	103,8	2,63	511,2	0,61
3,92	792	101,2	127,3	655,2	640,2	117,6	3,03	511,6	0,57
4,025	847	103,1	128,9	655,5	641,0	185,4	4,28	511,0	0,51
6,06	804	101,6	116,1	660,4	640,4	8,25	0,15	500,1	2,66
6,08	764	100,2	102,9	660,4	639,8	8,94	0,16	499,9	3,86
5,99	814	102,0	130,3	660,2	640,5	39,2	0,69	500,5	1,30
6,00	734	99,0	134,3	660,2	639,3	64,9	1,14	500,4	0,90
6,00	754	99,8	135,6	660,2	639,6	87,3	1,54	500,4	0,80
6,00	774	100,6	136,7	660,2	639,9	123,6	2,18	500,4	0,70
6,015	834	102,6	137,8	660,2	640,8	170,7	3,01	500,4	0,62
6,045	804	101,6	137,9	660,3	640,4	223,2	3,94	500,2	0,62
7,925	701	97,8	114,9	663,4	638,8	8,05	0,11	492,2	3,40
8,015	701	97,8	123,9	663,5	638,8	10,4	0,14	491,7	2,58
8,00	831	102,5	126,5	663,5	640,8	12,8	0,17	491,8	2,34
8,00	801	101,5	140,9	663,5	640,3	88,9	1,20	491,8	0,98
8,00	726	98,7	142,6	663,5	639,2	154,2	2,07	491,8	0,79
7,99	781	100,8	143,6	663,5	640,1	227,2	3,05	491,8	0,73
8,02	781	100,9	136,5	663,5	640,1	38,4	0,52	491,7	1,40
8,025	781	100,9	139,2	663,6	640,0	66,3	0,89	491,7	1,26
7,99	801	101,5	142,1	663,5	640,3	121,8	1,65	491,8	0,875
7,92	821	102,2	142,9	663,4	640,7	177,0	2,39	492,2	0,79
8,01	761	100,1	143,3	663,5	639,7	234,4	3,17	491,7	0,75

Zahlentafel 10. Wasserabscheider E.

p_1 kg/qcm	p_2 mm Hg	t_{2s} °C	t_2' °C	i_1 WE	i_2 WE	G kg/st	w m/sk	r_1 WE	y vH
2,035	736	99,1	107,0	647,4	639,35	24,4	1,16	526,5	0,82
2,00	801	101,5	110,3	647,3	640,35	48,30	2,30	526,8	0,531
2,00	756	99,9	111,7	647,3	639,7	79,9	3,80	526,8	0,40
2,00	736	99,1	112,2	647,3	639,35	142,6	6,78	526,8	0,342
2,005	716	98,3	113,0	647,3	639,0	176,4	8,38	526,8	0,285
4,02	827	102,4	117,9	655,5	640,7	16,6	0,41	511,0	1,49
4,00	812	101,9	121,9	655,4	640,6	26,4	0,67	511,2	1,27
4,00	862	103,6	126,5	655,4	641,2	78,5	2,00	511,2	0,71
4,015	827	102,4	127,8	655,4	640,7	124,8	3,21	511,1	0,59
4,01	757	99,9	128,6	655,4	639,7	152,6	3,93	511,1	0,47
4,01	827	102,4	129,4	655,4	640,7	189,6	4,88	511,1	0,43
6,00	784	100,9	128,8	660,2	640,1	25,00	0,44	500,4	1,44
6,00	784	100,9	133,6	660,2	640,1	57,8	1,00	500,4	0,98
6,01	774	100,6	135,7	660,3	639,95	82,6	1,46	500,3	0,82
6,01	784	100,9	137,3	660,3	640,1	127,7	2,25	500,3	0,66
6,00	724	98,7	123,4	660,2	639,15	14,05	2,47	500,4	1,82
6,00	774	100,6	137,4	660,2	639,95	147,2	2,59	500,4	0,64
6,00	914	105,2	138,6	660,2	641,8	227,8	4,02	500,4	0,58
8,005	744	99,4	118,9	663,5	639,5	12,05	0,16	491,8	3,05
8,00	754	99,8	129,5	663,5	639,65	14,40	0,20	491,8	2,06
8,00	819	102,1	137,1	663,5	640,65	31,80	0,43	491,8	1,35
7,99	804	101,6	139,7	663,5	640,4	59,4	0,80	491,9	1,10
7,955	804	101,6	142,2	663,5	640,4	116,4	1,57	492,1	0,88
8,00	789	101,1	143,0	663,5	640,2	140,1	1,57	492,8	0,79
8,00	845	103,1	144,1	663,5	641,0	208,6	2,81	491.8	0,70

Zahlentafel 11. Kupferscheibe als Abscheider.

4,085	912	105,1	123,3	655,7	641,8	21,44	1,43	510,7	1,08
4,05	912	105,1	125,7	655,6	641,8	47,63	3,15	510,9	0,82
4,10	1002	107,9	126,4	655,7	642,8	95,76	6,45	510,5	0,84
4,01	952	106,3	127,0	655,5	642,3	130,2	8,72	511,1	0,71
3,98	922	105,4	127,5	655,3	641,9	219,5	14,5	511,5	0,63
6,00	737	99,2	131,8	660,2	639,4	29,1	1,32	500,4	1,14
6,07	777	100,7	135,1	660,4	640,0	59,40	2,69	500,0	0,88
5,96	797	101,4	135,7	660,1	640,3	101,9	4,61	500,6	0,78
6,08	967	106,8	136,2	660,4	642,4	159,5	7,23	500,0	0,88
6,01	942	106,0	136,1	660,3	642,2	227,5	10,3	500,4	0,74
8,01	805	101,7	137,1	663,5	640,4	25,4	0,88	491,8	1,36
8,12	855	103,3	141,5	663,7	641,1	62,4	2,15	491,5	0,81
7,95	900	104,7	142,3	663,4	641,7	94,5	3,26	492,0	0,88
8,00	920	105,3	141,7	663,5	641,9	153,6	5,28	491,8	0,95
7,95	860	103,5	141,8	663,4	641,2	200,9	6,97	492,0	0,92

Der Dampfdruck ist dabei bei allen Abscheidern von wesentlichem Einfluß. In der Kurventafel, Fig. 36, ist für die Dampfgeschwindigkeit von 4 m/sk die aus den Fig. 30 bis 35 abgegriffene Dampffeuchtigkeit als Funktion des Druckes eingetragen. Bei allen Wasserabscheidern zeigt hiernach der Verlauf der Kurve lineare Gestalt und mit zunehmendem Druck ein Ansteigen der Feuchtigkeit.

Aus dem Resultat der Versuchsreihen α und β läßt sich daher der Schluß ziehen, daß der größte Teil des im Dampf enthaltenen Wassers an der Rohrsohle läuft und nur ein ganz geringer Teilbetrag in feinster Verteilung im Dampf suspendiert ist. Diese Menge läßt sich nur äußerst schwer entfernen, da weder die durch die Erdanziehung noch die durch das Beharrungsvermögen hervorgerufene Krafteinwirkung der durch den Dampfstrom auf die Wasserpartikelchen erzeugten Bewegungskomponente wirksam zu begegnen vermöchte.

Ueber den Ursprung dieser Wasserteilchen läßt sich wohl mit Bestimmtheit die Behauptung aufstellen, daß dieselben durch Kondensationserscheinungen in den Dampfstrom gelangt sind und nicht aus der Wassermasse des Kessels beim Verdampfen mitgerissen wurden. Dies beweist die Versuchsreihe β, wonach mit zunehmendem Druck auch die Dampffeuchtigkeit hinter dem Abscheider wächst. Würde das Wasser aus dem Kessel stammen, so wäre anzunehmen, daß bei gleichbleibender Geschwindigkeit die Dampfnässe eher abnehmen müßte, da die Verdampfung mit zunehmendem Druck sich erfahrungsgemäß ruhiger abspielt.

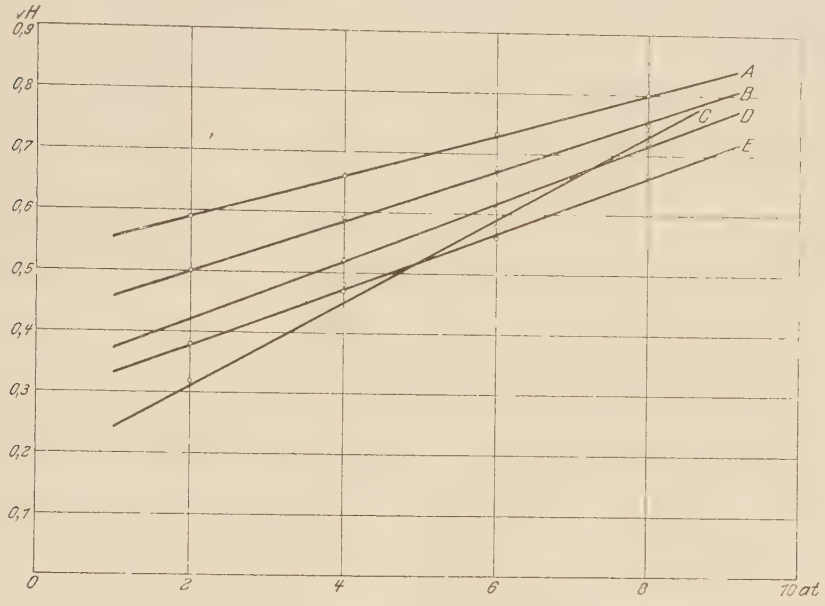

Fig. 36. Abhängigkeit der Dampffeuchtigkeit vom Kesseldruck.

Das aus dem Kessel mitgerissene Wasser setzt sich jedenfalls, wie auch Denton beobachtet hat, schon in dem ersten horizontalen Teil der Dampfleitung ab, so daß in der Praxis, wo immer mit einer längeren Rohrleitung gerechnet wird, der Einfluß des Kessels auf die Dampffeuchtigkeit nur eine untergeordnete Bedeutung erlangt, falls nicht ein Schäumen im Kessel auftritt, oder grobe Konstruktionsfehler vorliegen.

Besonders charakteristisch gestaltet sich die Eichkurve der Kupferscheibe, Fig. 35. Dieselbe verläuft bei geringen Dampfgeschwindigkeiten ebenso wie die der andern Abscheider. Von etwa 2 m/sk bis 7 m/sk zeigt sich jedoch wieder ein Ansteigen der Feuchtigkeit hinter der Scheibe. Von 7 m ab ergibt sich dann wieder derselbe langsame Abfall der Kurve, wie bei den übrigen Apparaten.

Dieser eigentümliche Verlauf läßt sich darauf zurückführen, daß das an der Rohrsohle fließende Wasser durch die Reibung am Dampfstrom eine Beschleunigung erhält, die bei etwa 2 m/sk eine solche Größe erreicht, daß der höchste Punkt der Staukurve des an der Scheibe aufgestauten Wassers über die Oberkante der Stauwand (s. Fig. 13) fällt und somit Wasser über dieselbe in das Drosselkalorimeter gelangt.

Es unterliegt jedoch keinem Zweifel, daß die exzentrisch gebohrte Scheibe auf denselben oder wenigstens nahezu denselben Effekt gebracht werden kann, wie die andern Wasserabscheider, wenn dieselbe in eine Erweiterung der Rohrleitung von etwa $1^1/_2$ fachem Durchmesser derselben angebracht wird und durch eine zweite

davor gesetzte Scheibe noch eine Richtungsänderung des Dampfes herbeigeführt werden könnte. Diese einfache Abscheidevorrichtung hätte neben dem Vorteil der Einfachheit noch den geringerer Wärmeverluste, die bei den übrigen Systemen ziemlich beträchtlich sind, wie aus den Versuchen des folgenden Abschnittes (γ) hervorgeht.

γ) Bestimmung des Wärmeverlustes der Wasserabscheider.

Die Durchführung dieser Versuchsreihe ist auf S. 65/67 eingehend erörtert. Der Zweck dieser Bestimmung ist die durch die Oberfläche der Wasserabscheider hervorgerufenen Wärmeverluste festzustellen, um die Resultate dann bei den Ergebnissen der unter β) verzeichneten Versuche in Rechnung bringen zu können, bei denen die Feuchtigkeit vor dem Wasserabscheider bekannt sein mußte. Letztere ließ sich aber nur dann feststellen, wenn man von der im Abscheider abgeschiedenen Menge die durch Kondensation im Abscheider hinzugetretene subtrahierte. Dabei zeigt sich, daß der Abscheider *B*, welcher bei der vorausgehenden Untersuchung (Einfluß der Dampfgeschwindigkeit) die besten Resultate lieferte, auch in bezug auf die Verluste dem Abscheider *A* gegenüber, welcher denselben Durchgangsquerschnitt besitzt, im Vorteile ist.

Zahlentafel 12.

p	G' kg/st	r	Q
Wasserabscheider A.			
1) Isolation mit Seidenzopf			
4	0,458	511,2	233
6	0,620	500,4	316
8	0,680	491,8	347
2) ohne Isolation			
4	1,822	511,2	233
6	1,925	500,4	316
8	2,51	491,8	347
Wasserabscheider B.			
1) Isolation mit Kieselguhr			
2	0,184	526,8	96,5
4	0,252	511,2	115
6	0,320	500,4	162
8	0,380	491,8	187
2) Isolation mit Seidenzopf			
2	0,188	526,8	99
4	0,205	511,2	104,8
6	0,244	500,4	122,2
8	0,341	491,8	169
3) ohne Isolation			
2	0,570	526,8	300
4	0,696	511,2	355
6	0,845	500,4	422,6
8	0,960	491,8	472

p	G' kg/st	r	Q
Wasserabscheider C.			
1) Isolation mit Seidenzopf			
4	0,384	511,2	189
6	0,534	500,4	267
8	0,618	491,8	340
2) ohne Isolation			
4	1,194	511,2	611
6	1,516	500,4	808
8	1,735	491,8	852
Wasserabscheider D.			
1) Isolation mit Seidenzopf			
2	0,180	526,8	95
4	0,330	511,2	168,5
6	0,420	500,4	220
8	0,498	491,8	245
2) ohne Isolation			
2	0,720	526,8	379
4	1,596	511,2	817
6	2,130	500,4	1065
8	2,335	491,8	1148
Wasserabscheider E.			
1) Isolirung mit Seidenzopf			
2	0,548	526,8	288
4	0,618	511,2	316
6	0,780	500,4	380
8	0,900	491,8	442,6
2) ohne Isolation			
2	1,486	526,8	782
4	1,74	511,2	889
6	2,085	500,4	1042
8	2,480	491,8	1220

In vorstehender Zahlentafel 12 bedeutet

p = den Kesseldruck in kg/qcm,
G' = die im Abscheider stündlich kondensierte Dampfmenge,
r = die Verdampfungswärme in WE und
Q = die nach außen abgegebene Wärmemenge in WE.

Wasserabscheider B, welcher von einer Verwendung im Laboratorium her bereits eine feste Kieselgurisolation besaß, wurde auch mit dieser geprüft, wobei sich die Seidenzopfisolation trotz geringerer Dicke als wirksamer erwies [1]).

Das Kurvenbild Fig. 37 zeigt die Größen der Verluste, ihre Abhängigkeit vom Druck sowie die Wirkung der Isolierung.

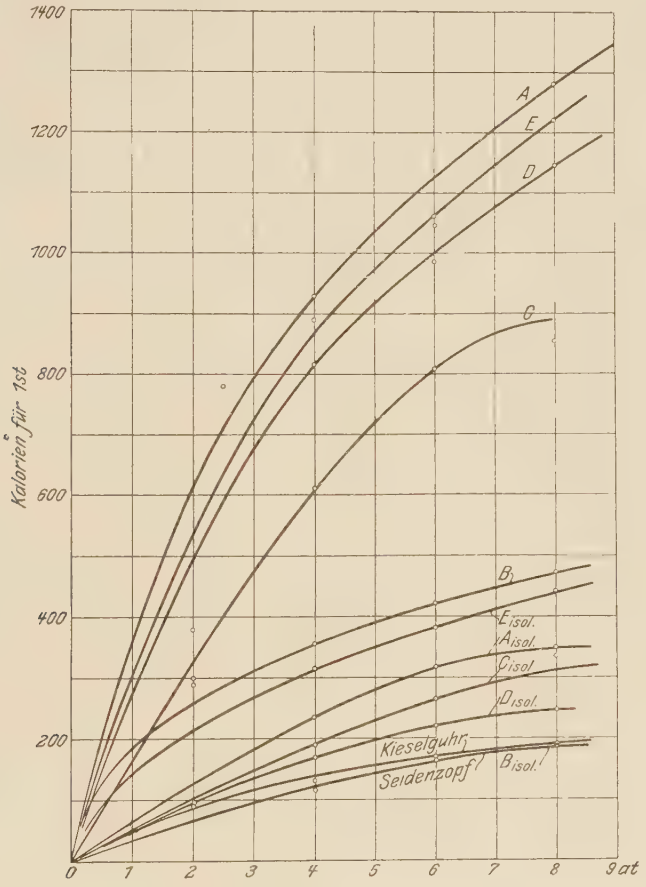

Fig. 37. Wärmeverluste der Abscheider.

Kurz zusammengefaßt ist sonach das Resultat der Prüfung der Wasserabscheider folgendes:

Die Dampffeuchtigkeit hinter dem Abscheider ist nahezu unabhängig von der Feuchtigkeit vor demselben, dagegen zeigt sie eine gesetzmäßige Abhängigkeit von Dampfgeschwindigkeit und Dampfdruck.

Der Hauptteil der Feuchtigkeit läuft an der Rohrsohle der horizontalen Leitungen und läßt sich leicht durch irgendwelche Abscheiderkonstruktionen abnehmen.

[1]) Vergl. Nusselt, Die Wärmeleitfähigkeit von Wärmeisolationsstoffen, Mitteilung über Forschungsarbeiten 1908 Heft 63 und 64.

Die im Dampf suspendierte Wassermenge kann durch eine schroffe Richtungsänderung des Dampfstromes noch verringert werden. So gelangt man zu der einfachen Abscheiderbauart, die S. 49 angegeben ist.

Praktische Ausführung der Feuchtigkeitsbestimmung des Wasserdampfes.

Für die praktische Ausführung von Feuchtigkeitsbestimmungen in Dampfleitungen ergibt sich aus den vorstehenden Ergebnissen, daß unmittelbar vor derjenigen Stelle, an der die Feuchtigkeit mit dem Drosselkalorimeter gemessen werden soll, ein Wasserabscheider einzubringen ist, der die gesamte an der Rohrsohle fließende Wassermenge abnimmt. Da nun die von dem Wasserabscheider durchgelassene Feuchtigkeit zwar vom Dampfdruck und der Dampfgeschwindigkeit, dagegen nicht von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider abhängig ist, so ist es nicht nötig, in einer Dampfleitungsanlage ein Drosselkalorimeter dauernd eingebaut zu lassen, um in jedem Augenblick eine Messung vornehmen zu können. Es genügt vielmehr, diese Bestimmung nur einmal für die in Betracht kommenden Grenzen von Dampfgeschwindigkeit und Dampfdruck durchzuführen. Hierdurch ist gewissermaßen eine Eichung des Wasserabscheiders erzielt und man kann dann jederzeit die Feuchtigkeit des Dampfes aus der Eichkurve entnehmen, wenn durch Dampfmesser oder andre Meßapparate die Dampfmenge und durch das Manometer der Dampfdruck festgestellt ist.

Für sehr große Dampfmengen, für welche die Konstruktion eines Drosselkalorimeters, durch das die ganze Dampfmenge geleitet werden könnte, wegen de damit verbundenen hohen Kosten kaum ausgeführt werden dürfte, wäre zum Zweck der Eichung des Wasserabscheiders eine Dampfprobe mit einem rotierenden En nehmer (wie in Fig. 7 dargestellt), zur Feuchtigkeitsbestimmung abzunehmen. N diese Probe wird im Drosselkalorimeter untersucht. Dabei muß sowohl die d Hauptleitung passierende wie die abgenommene Dampfmenge durch Kondensa messung oder Dampfmesser bestimmt werden, damit die Dampfmengen in de Hauptleitung und der Entnahmevorrichtung im Verhältnis der Querschnitte eing stellt und die zugehörigen Geschwindigkeiten daraus berechnet werden können.

Schlußbemerkung.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind kurz zusammengefaßt folgend

Im ersteren Teil der Arbeit wurde die Konstruktion eines einwandfreien, ei fähigen Drosselkalorimeters durchgeführt, bei welchem durch konstruktive Maß nahme Sorge getragen wurde, daß das in das Kalorimeter gelangende Wass auch wirklich zur Verdampfung kommt und daß außerdem ein Wärmeübergan von der Hochdruck- zur Niederdruckseite nach Möglichkeit vermieden wird. Du die Temperaturmessung im Expansionsraum mittelst Thermoelementen wurde Temperaturverlauf hinter der Drosselstelle genau festgestellt und auf Grund die Ergebnisse der für die Messungen günstigste Querschnitt ausgewählt. Für Prüfung des Drosselkalorimeters wurde eine neue Methode benutzt, bei welc die Dampffeuchtigkeit in kalorimetrisch genau meßbarer Weise verändert wurde. Es gelang dabei ein Instrument zu bauen, das Messungen bis auf etwa 0,02 vH ge stattet.

Die hauptsächlichste Fehlerquelle ist bei den bisher üblichen Konstruktio die Entnahme einer Dampfprobe, welche nach den mitgeteilten Versuchen unn

lich, ohne daß sich der Zustand des Dampfes hierbei ändert, vorgenommen werden kann. Dieselbe wurde dadurch vermieden, daß das Kalorimeter so groß gebaut wurde, daß es die ganze die Leitung passierende Dampfmenge bewältigen konnte.

Im zweiten Teil wurde die Untersuchung von Wasserabscheidern auf ihre Wirkungsweise und ihren Wirkungsgrad ausgeführt und dabei das Resultat gewonnen, daß die Feuchtigkeit des Dampfes hinter dem Wasserabscheider abhängig ist von Kesseldruck, Dampfgeschwindigkeit und Abscheiderkonstruktion, dagegen nahezu unabhängig von der Feuchtigkeit vor dem Abscheider. Schließlich wurden noch die Wärmeverluste mehrerer Wasserabscheider bestimmt.

Die Untersuchungen mit Drosselkalorimeter und Wasserabscheider lieferten als wichtigstes Ergebnis ein Bild des Zustandes von nassem Dampf in Rohrleitungen. Es wurde durch dieselben der Beweis erbracht, daß die im Dampf suspendierte Wassermenge nur einen sehr kleinen Bruchteil des vom Dampf mitgeführten Wassers bildet, welches sich bei längeren horizontalen Leitungen zum weitaus größten Teile alsbald selbst aus dem Dampf ausscheidet und an der Rohrsohle entlang läuft.

Dadurch ist ein Mittel an die Hand gegeben, die Wasserabscheider einfach und zweckmäßig zu bauen. Das an der Rohrsohle fließende Wasser läßt sich nämlich leicht durch eine einfache Scheibe mit exzentrischer Bohrung entnehmen, die zwischen zwei Flanschen geklemmt ist oder, um bei größeren Dampfgeschwindigkeiten ein Mitreißen von Wasser über die Scheibenkante zu vermeiden, in einer Erweiterung der Rohrleitung angebracht ist. Durch Anwendung einer zweiten Scheidewand vor der erwähnten Scheibe, durch welche eine schroffe Richtungsänderung des Dampfes hervorgerufen wird, kann nach den Resultaten, die mit den verschiedenen Abscheidern erhalten wurden, auch die im Dampf suspendierte Wassermenge noch verringert werden. Diese einfache Abscheidevorrichtung bietet noch den Vorteil, daß sie nur verschwindend kleine Wärmeverluste bedingt.

Vorliegende Untersuchungen wurden von Mai 1907 bis Mai 1909 (insgesamt 97 Versuchstage) im Laboratorium für technische Physik der Königl. Technischen Hochschule zu München ausgeführt. Die Geldmittel hatte der Verein deutscher Ingenieure zur Verfügung gestellt und sei an dieser Stelle der Dank hierfür ausgedrückt.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer, Hrn. Prof. Dr. Oskar Knoblauch, auf dessen Veranlassung und unter dessen Leitung diese Arbeit entstand, für das meinen Studien entgegengebrachte Interesse, sowie für die mannigfachen Anregungen meinen ergebensten Dank auszusprechen.

München, Pfingsten 1909.

Buchdruckerei A. W. Schade, Berlin N., Schulzendorfer Str. 26.